

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VICTOR SALVINO BORGES

UTILIZAÇÃO DE UM RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE PARA ANÁLISE DE  
EMISSÕES ELETROMAGNÉTICAS ORIUNDAS DE DESCARGAS ELÉTRICAS  
PARCIAIS EM ISOLADORES

CURITIBA

2016

VICTOR SALVINO BORGES

UTILIZAÇÃO DE UM RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE PARA ANÁLISE DE  
EMISSIONES ELETROMAGNÉTICAS ORIUNDAS DE DESCARGAS ELÉTRICAS  
PARCIAIS EM ISOLADORES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Sistemas Eletrônicos, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Márlcio José do Couto Bonfim

Coorientador: Prof. Dr. Edemir Luiz Kowalski

CURITIBA

2016

---

B732u

Borges, Victor Salvino

Utilização de um rádio definido por software para análise de emissões eletromagnéticas oriundas de descargas elétricas parciais em isoladores/ Victor Salvino Borges. – Curitiba, 2016.

91 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2016.

Orientador: Málio José do Couto Bonfim – Co-orientador: Edemir Luiz Kowalski.

Bibliografia: p. 82-86.

1. Descargas parciais. 2. Isoladores e isolamentos elétricos. 3. Interferência elétrica. 4. Radiofrequência. I. Universidade Federal do Paraná. II. Bonfim, Málio José do Couto. III. Kowalski, Edemir Luiz. IV. Título.

CDD: 621.31937

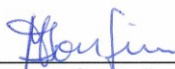
---

## TERMO DE APROVAÇÃO

Victor Salvino Borges

Utilização de um Rádio Definido por Software para análise de  
emissões eletromagnéticas oriundas de descargas elétricas parciais  
em isoladores

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de  
Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal do Paraná.



---

Prof. Dr. Málio José do Couto Bonfim – Orientador  
Universidade Federal do Paraná



---

Prof. Dr. Edemir Luiz Kowalski – Coorientador  
Universidade Federal do Paraná



---

Prof. Dr. Evelio Martín García Fernández – Convidado  
Universidade Federal do Paraná



---

Prof. Dr. André Eugenio Lazzaretti – Convidado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Curitiba, 11 de Março de 2016

*Dedico este trabalho a todos que amo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Dr. Málio José do Couto Bonfim, pela orientação deste trabalho, sempre disposto a colaborar com seus conhecimentos e dirimir todas as dúvidas.

Ao Prof. Edemir Luiz Kowalski, pela amizade, apoio e orientação durante todos esses anos que trabalhamos juntos.

Aos colegas e amigos dos Institutos Lactec, Guilherme Hernaski, Luiz Felipe Toledo, Márcio Sans, pelo auxílio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Rondon, Munir, Murilo, Suguiy, Ishii, Sid, Tiago, Celin, Durds, Dudu, Gabriel V., Gabriel U., Breno, Luiz Fernando, Caio, Raul, Leonardo, Luka, Nils, Žiga e todos os outros, que próximos ou distantes fisicamente sempre contribuíram para que conseguisse alcançar meus objetivos.

A minha amada Bruna, que me apoiou todos os dias para que conseguisse completar este desafio.

A minha família, meus pais Ricardo Pereira Borges e Claudia Regina Salvino Borges, meus irmãos Vinícius Salvino Borges e Lucas Salvino Borges, meus avós Joaquim Salvino Neto e Adair Divina Salvino, Sebastião de Oliveira Borges e Maria de Lurdes Pereira Borges que me apoiaram, incentivaram e amaram incondicionalmente desde o início.

Aos Institutos Lactec pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

Inspeções periódicas de sistemas isolantes elétricos, como cadeia de isoladores de disco em linhas de transmissão, deveriam ser realizadas com a finalidade de avaliar em campo o estado de degradação de isoladores elétricos, antes da ocorrência da falha, garantindo a confiabilidade e manutenção do fornecimento de energia elétrica. Porém os custos elevados de equipamentos de inspeção inviabilizam o monitoramento periódico dos dispositivos que compõem o sistema elétrico. Sendo assim o presente trabalho apresenta o desenvolvimento do protótipo de um sistema de detecção de Rádio Interferência de baixo custo baseado em um RDS (Rádio Definido por Software) para detecção e análise de componentes de rádio frequência originadas por descargas parciais em isoladores elétricos usados em linhas de transmissão e redes de distribuição de energia elétrica. Para validação do protótipo, testes de caracterização e operação em laboratório foram realizados sendo que os resultados obtidos foram comparados com os resultados de um equipamento comercial atualmente utilizado por concessionárias de energia elétrica em inspeções de campo por RFI (*Radio Frequency Interference*). Ao serem comparados os resultados dos testes do equipamento de RFI comercial e o protótipo desenvolvido, verificou-se que este possui características como sensibilidade e largura de banda superiores ao do comercial e desempenho semelhante durante as inspeções.

Palavras-chave: Descargas parciais, inspeção de isoladores, rádio interferência, redes elétricas, RDS, RFI, SDR.

## **ABSTRACT**

Periodic inspections of electrical insulation using techniques such as radio interference, should be constantly performed in the field in order to assess the state of degradation before the failure of electrical insulators, ensuring the reliability and maintenance of the electric power distribution system. However high costs of inspection make equipment the periodic monitoring of all electric system devices unfeasible. This work presents the development of a low cost Radio Interference detection system based on an SDR (Software Defined Radio) for detection and analysis of radio frequencies caused by partial discharges in electrical insulators used in power transmission and distribution networks. In order to validate the prototype, laboratory tests were carried out and the results were compared with an equipment currently used by electric companies in the field inspection of RFI. At the end of the characterization tests, after comparing the prototype with the currently used equipment, the prototype presented to have such characteristics as bandwidth and sensitivity better than the one currently used by companies.

Key words: Insulator inspection, partial discharges, power lines, radio interference, RFI, SDR.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Átomo de um material dielétrico a) Átomo não polarizado. b) Forças no átomo quando submetido a um campo elétrico $E$ .....	22
Figura 2. Processo de avalanche de elétrons iniciado a partir de um eletrodo negativo. (a) Desprendimento e colisão do elétron; (b) formação de um par de elétrons livres – impacto de um elétron com um átomo neutro, um elétron adicional deixa um íon positivo para trás; (c) multiplicação – os elétrons se movem criando íons positivos quando se multiplicam. ....	23
Figura 3. Pulso de descarga parcial medida através da variação da corrente no tempo. ....	24
Figura 4. Ilustração da evolução de uma descarga parcial interna .....	25
Figura 5. Representação da descarga parcial superficial em um material dielétrico .....	26
Figura 6. Isolador retirado de campo devido a degradação por descargas parciais superficiais .....	26
Figura 7. Eletrodo com efeito corona .....	27
Figura 8. Imagem obtida a partir de uma camera ultravioleta .....	29
Figura 9. Imagem obtida com um equipamento de termovisão .....	29
Figura 10. Transformador de corrente de alta frequencia .....	31
Figura 11. Exemplo de utilização em campo do transformador de corrente na inspeção de campo. ....	31
Figura 12. Equipamento RFI Locator modelo 240A .....	32
Figura 13. Imagens do display do equipamento RFI Locator durante testes em laboratório detectando DPs de isoladores corroídos. a) ruído de fundo, b) sinal irradiado pelo isolador .....	33
Figura 14. Exemplo de utilização em campo do equipamento PDS 100 (Doble) .....	34
Figura 15. Gráfico de inspeção realizada utilizando o equipamento PDS 100 .....	34
Figura 16. Pico do domínio de frequencia(649 MHz) de maior intensidade na faixa de descargas internas convertido para o domínio do tempo, obtico próximo a um comutador com carga (LTC – Load Tap Changer).....	35
Figura 17. Sinais no domínio do tempo detectados durante inspeções realizadas em uma subestação de 400 kV. a),b) e c) 386 MHz, d) e) e f) 179 MHz. Adaptado de Nesbitt et al. (2010) .....	36
Figura 18. Estrutura básica do RDS .....	38

Figura 19. Comparação entre um receptor analógico e um receptor RDS.....	39
Figura 20. a) Osciloscópio Tektronix modelo MSO 2012B e b) Osciloscópio Agilent modelo DSO-X 2002A.....	43
Figura 21. Gerador de sinais de RF Agilent E4432B.....	43
Figura 22. Antena da marca LARSEN modelo NMOQ.....	44
Figura 23. Equipamento RFI Locator modelo 240A .....	44
Figura 24. Fonte de alta tensão BIDDLE usado nos experimentos de tensão aplicada em laboratório. ....	45
Figura 25. Isolador de vidro do tipo disco.....	45
Figura 26. Isolador de vidro com o pino corroído .....	46
Figura 27. Isolador polimérico rede 34,5 kV .....	46
Figura 28. Arranjo de ensaio .....	47
Figura 29. Sinal de descarga parcial no domínio do tempo medido com uma antena .....	48
Figura 30. Espectro de frequência obtido com um isolador novo em duas condições de tensão aplicada, 20 kV (a) e 0 kV (b) .....	49
Figura 31. Espectro de frequência obtido com um isolador corroído em duas condições de tensão aplicada, 20 kV (a) e 0 kV (b) .....	49
Figura 32. Interface RDS - RTL2832 e R802T .....	51
Figura 33. Hardware aberto com a indicação dos componentes.....	51
Figura 34: Exemplo de aplicação de receptor de TV digital para PCTV.....	52
Figura 35: Diagrama de blocos simplificado do R820T .....	52
Figura 36: Teste de sensibilidade do RDS, curvas a) sem sinal na entrada do RDS – ruído de fundo e b) sinal aplicado de -118 dBm em 40 MHz.....	55
Figura 37: Resposta do RDS a um sinal de -50 dBm na faixa de frequência de 28,4 MHz a 31,8 MHz. O sinal medido no centro da faixa (30,1 MHz) foi de -42 dBm, indicando um erro de 8 dBm em relação ao sinal injetado .....	56
Figura 38: Curva de linearidade em amplitude do RDS na frequência de 40 MHz ...	57
Figura 39. Raspberry Pi 1 Modelo B+ .....	58
Figura 40: Raspberry Pi Modelo B+ com a interface RDS .....	59
Figura 41. Diagrama de blocos da análise no domínio da frequência.....	59
Figura 42. Arranjo de ensaio de geração de corona pontaxplano .....	60
Figura 43: Espectrograma (frequência x tempo) do ruído captado sem (região superior) e com ( região inferior) a presença de descargas parciais.....	61

Figura 44. Ilustração do arranjo de ensaio de caracterização dos equipamentos.....	62
Figura 45. Teste de sensibilidade do equipamento comercial de RFI, curvas a) sem sinal na entrada do equipamento – ruído de fundo e b) sinal aplicado de -110 dBm em 40 MHz.....	63
Figura 46. Resposta do equipamento comercial a um sinal de -56 dBm, realizando uma varredura entre as frequências de 39,7 MHz a 40,3 MHz. ....	63
Figura 47. Imagem do display do equipamento comercial apresentando um período completo da senoide do sinal modulante de 131 Hz.....	64
Figura 48. Imagens do protótipo desenvolvido.....	65
Figura 49. Bateria de alimentação.....	66
Figura 50. Imagem do arranjo de ensaio simulando uma fase de uma torre de transmissão de 500 kV.....	66
Figura 51. Indicação com setas vermelhas os isoladores corroídos .....	67
Figura 52. Imagem da camera ultravioleta .....	67
Figura 53. Imagem da camera termográfica.....	68
Figura 54. Diagrama de blocos da análise no domínio do tempo.....	69
Figura 55. Comparação do ruído de fundo obtido com o equipamento comercial e o protótipo desenvolvido sintonizados em 40 MHz .....	70
Figura 56. Comparação dos sinais de descargas parciais medidos com o equipamento comercial e o protótipo sintonizados em 40 MHz .....	71
Figura 57. Comparação do ruído de fundo obtido com o equipamento comercial e o protótipo desenvolvido sintonizados em 30 MHz .....	72
Figura 58. Comparação dos sinais de descargas parciais medidos com o equipamento comercial e o protótipo sintonizados em 30 MHz .....	72
Figura 59. Isolador polimérico para redes de distribuição de 34,5 kV .....	73
Figura 60. Detalhe dos danos causados ao isolador polimérico .....	73
Figura 61. Comparação do ruído de fundo medidos com o equipamento comercial e o protótipo sintonizados em 30 MHz e 40 MHz .....	74
Figura 62. Arranjo de ensaio com o isolador polimérico.....	74
Figura 63. Comparação dos sinais de descargas parciais medidos com o equipamento comercial e o protótipo sintonizados em 30 MHz e 40 MHz .....	75
Figura 64. Equipamento de medição padrão de descargas parciais da Marca Biddle – Partial Discharge Detector Series 27000 .....	76

Figura 65. Medição das descargas parciais com o protótipo em 30 MHz (Curva azul),representação do sinconismo com a senoide de 60 Hz. ....	77
Figura 66. Medição padrão de descargas parciais. Pulsos de referência indicados com setas vermelhas .....	77
Figura 67. Medição realizada com o protótipo sobreposta ao sinal senoidal de 60 Hz .....	78
Figura 68. a) Medição de descargas parciais padrão, b) medição realizada com o protótipo desenvolvido somado ao sinail senoidal de 60 Hz. As setas vermelhas indicam os pulsos de refêrencias .....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dispositivos RDS de baixo custo encontrados no mercado .....	50
Tabela 2: Valores típicos .....	53
Tabela 3: Frequências intermediárias .....	53
Tabela 4. Computadores de baixo custo .....	57
Tabela 5. Comparação entre o equipamento comercial e o protótipo desenvolvido .	64

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CI – Circuito integrado

DEC – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

DEMIC – Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora

DIC – Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora

DP – Descarga Parcial

FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

FIC – Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora

GIS – *Gas Insulated Switchgear*

GPIO - *General Purpose Input/Output*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

RDS – Rádio Definido por *Software*

RF – Rádio Frequência

RFI – *Radio Frequency Interference*

SDR – *Software Defined Radio*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{E}$  – Campo elétrico vetorial

$\Delta V$  – Diferença de potencial elétrico

$\vec{F}$  – Força vetorial

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	18
1.1	MOTIVAÇÃO .....	19
1.2	OBJETIVOS .....	19
1.2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	21
2.1	PROCESSO DE IONIZAÇÃO DE MATERIAIS DIELÉTRICOS .....	21
2.2	DESCARGAS PARCIAIS .....	23
2.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	27
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	28
3.1	INSPEÇÃO INSTRUMENTAL DE ISOLADORES POR RFI .....	28
3.2	RDS – RÁDIO DEFINIDO POR <i>SOFTWARE</i> .....	37
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	41
4.1	MÉTODOS .....	41
4.1.1	TESTES PRELIMINARES PARA CARACTERIZAÇÃO DOS SINAIS DE RF .....	41
4.1.2	PROPOSTA DE SOLUÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DO <i>HARDWARE</i> .....	41
4.1.3	DESENVOLVIMENTO E TESTES INICIAIS .....	42
4.1.4	VALIDAÇÃO EM LABORATÓRIO .....	42
4.2	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	42
4.2.1	OSCILOSCÓPIOS .....	42
4.2.2	GERADOR DE SINAIS DE RF .....	43
4.2.3	ANTENA .....	43
4.2.4	EQUIPAMENTO COMERCIAL DE RFI .....	44
4.2.5	FONTE DE ALTA TENSÃO .....	44



4.2.6	ISOLADORES .....	45
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	46
5	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO .....	47
5.1	TESTES PRELIMINARES PARA CARACTERIZAÇÃO DOS SINAIS DE RF .. .....	47
5.2	PROPOSTA DE SOLUÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DOS <i>HARDWARES</i> .....	50
5.2.1	ESPECIFICAÇÃO DO RDS.....	50
5.2.2	CARACTERIZAÇÃO EM LABORATÓRIO DA INTERFACE RDS.....	54
5.2.3	COMPUTADOR DE BAIXO CUSTO .....	57
5.3	DESENVOLVIMENTO E TESTES INICIAIS .....	58
5.4	COMPARAÇÃO ENTRE EQUIPAMENTOS .....	62
5.5	VALIDAÇÃO EM LABORATÓRIO.....	65
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	80
6.1	TRABALHOS FUTUROS .....	82
	Apêndice A – Artigos Publicados .....	88

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico possui como finalidade a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica para os consumidores. Seu desempenho está intimamente ligado à integridade e confiabilidade dos componentes dielétricos (isolantes), como o vidro, cerâmica, polímeros, vernizes, gases como o SF<sub>6</sub>, que são utilizados em isoladores, transformadores, barramentos, disjuntores entre outros equipamentos.

A degradação e a falha destes componentes pode representar desligamentos não programados do fornecimento de energia elétrica, podendo deixar bairros, cidades ou até mesmo grandes regiões sem energia.

No Brasil a interrupção na entrega de energia elétrica impacta diretamente nos índices de continuidade determinados pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, sendo os principais DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, FEC - Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, DIC - Duração de Interrupção por Unidade Consumidora, FIC - Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora, DMIC - Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora (ANEEL, 2015a, 2015b).

Considerando este cenário, a manutenção preditiva ganha destaque, pois a confiabilidade e a necessidade de se prever possíveis falhas no sistema de isolamento das redes e seus equipamentos antes de sua ocorrência, passam a ser prioritárias para o sistema elétrico. Atualmente no caso de isoladores de cabos são aplicadas técnicas específicas de inspeção remota, tais como câmeras ultravioletas (câmera corona), ultrassom, termovisão e rádio interferência (RFI - *Radio Frequency Interference*) (ALESSI; OGAWA, 2010; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 2012; BORGES, 2011; GORCHINSKI et al., 2013; KANNUS; LEHTIO; LAKERVI, 1991; MOORE; PORTUGUES; GLOVER, 2005).

Os isoladores empregados na geração, transmissão ou distribuição de energia, possuem processos de degradação semelhantes, normalmente caracterizados pelo surgimento de descargas elétricas parciais que podem ser internas, superficiais ou do tipo corona (KREUGER, F.H., GULSKI, E. E KRIVDA, 1993). Por serem descargas elétricas, se manifestam como ondas eletromagnéticas no espectro de rádio frequência, sendo assim possível a detecção destes sinais a partir de equipamentos de RFI (BORGES, 2011; KOWALSKI et al., 2006; MUHR; SCHWARZ, 2006; SHIHAB; WONG, 2000).

Por serem os equipamentos de RFI de alto custo, isto acaba inviabilizando a realização de inspeções aplicando esta técnica no dia a dia dos eletricitistas durante suas atividades, sendo então estas inspeções realizadas somente frente a reclamações de rádio interferência, estruturas em risco, equipamentos de alto valor monetário ou que exigem alta confiabilidade.

Tendo em vista que isoladores elétricos são os componentes em maior número instalados no sistema elétrico e que a falha de um único isolador pode levar a prejuízos e efeitos de grandes proporções, com o intuito de prevenção de falhas surge a necessidade da inspeção destes constantemente.

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Os equipamentos de RFI comerciais utilizados na inspeção instrumentalizada de isoladores possuem preços que variam entre US\$15.000,00 e US\$60.000,00. A maioria destes equipamentos de medições e análises não foram concebidos com a finalidade de inspeção de equipamentos elétricos, mas sim para serem aplicados em medições e análises dos sistemas de telecomunicações.

Sendo assim o desenvolvimento de um equipamento específico e de baixo custo para detecção de RFI dedicado à inspeção de isoladores, proporcionará um avanço nos estudos relacionados ao tema, além de possibilitar o desenvolvimento de tecnologia nacional aplicada no auxílio da manutenção preditiva com um custo baixo. A disponibilidade deste equipamento, possibilitará a ampliação e disseminação da cultura de manutenção preditiva dentro das concessionárias de energia elétrica, resultando em redes de energia elétricas mais eficientes e confiáveis.

### 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho trata do desenvolvimento de um protótipo capaz de realizar a detecção de isoladores que possuam problemas (descargas parciais), através da análise das componentes de rádio frequência, a fim de se obter um equipamento nacional de baixo custo e de fácil utilização por parte dos operadores.

### 1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fundamentação teórica sobre os processos de geração de rádio frequência por descargas parciais;
- Levantamento do estado da arte acerca das técnicas de detecção de descargas parciais por rádio frequência;
- Realizar testes preliminares com isoladores em laboratório a fim de se conhecer melhor as características do problema de rádio interferência por descargas parciais;
- Desenvolver um protótipo, tendo como referência um equipamento comercial, capaz de detectar componentes de rádio frequência originadas de descargas parciais;
- Validar o protótipo em laboratório comparando com o equipamento comercial.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No primeiro capítulo deste trabalho estão apresentados os processos de degradação em dielétricos por descargas parciais geradoras de componentes de rádio frequência.

No capítulo dois serão abordados os conhecimentos necessários para compreensão da solução adotada, como RDS (Rádio Definido por *Software*), e conceitos de rádio interferência.

No capítulo três são apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

No capítulo quatro é abordado o desenvolvimento do protótipo, desde os teste iniciais em laboratório ao protótipo final assim como a validação em laboratório do protótipo.

Por fim, o capítulo cinco apresenta as conclusões do trabalho e as perspectivas para projetos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fim de contextualizar o fenômeno de descargas parciais (DPs), se faz necessário a compreensão de alguns princípios físicos, químicos e elétricos relacionados a este fenômeno. Neste capítulo serão apresentados sucintamente os mecanismos de ionização dos átomos de um material isolante, conceitos e descrições sobre o fenômeno de descargas parciais e degradação de dielétricos.

### 2.1 PROCESSO DE IONIZAÇÃO DE MATERIAIS DIELÉTRICOS

O processo de descargas parciais é dependente da ocorrência simultânea de duas condições, sendo que uma destas é a presença de um campo elétrico suficientemente intenso para acelerar cargas elétricas livres com a energia necessária para o início de um processo de avalanche, e a segunda condição é que hajam cargas elétricas livres (íons positivos e/ou elétrons) na região de campo elétrico intenso, podendo assim serem aceleradas (PALITÓ, 2015).

A avalanche de elétrons decorrente do processo de ionização de átomos que compõem um material dielétrico é denominada descargas elétricas (CUENCA, 1998, 2005).

Para melhor compreensão do fenômeno, considere o campo elétrico distribuído uniformemente no interior de um material dielétrico, sendo o campo elétrico proporcional ao gradiente do potencial, como descrito por

$$\vec{E} = -\nabla V. \quad (1)$$

Os átomos do material dielétrico que estão inseridos neste campo elétrico, tem seus elétrons da camada de valência (camada mais externa do átomo) submetidos a uma força que tenda a arrancá-los desta camada, porém como os elétrons possuem uma forte ligação com o núcleo do átomo o que se tem é uma polarização do átomo, como pode ser visto na Figura 1, a qual representa este efeito.

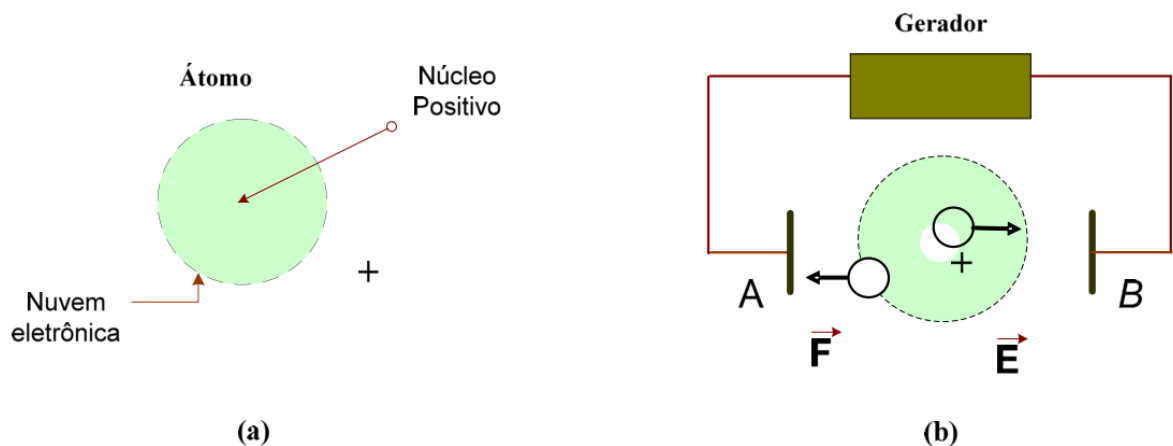


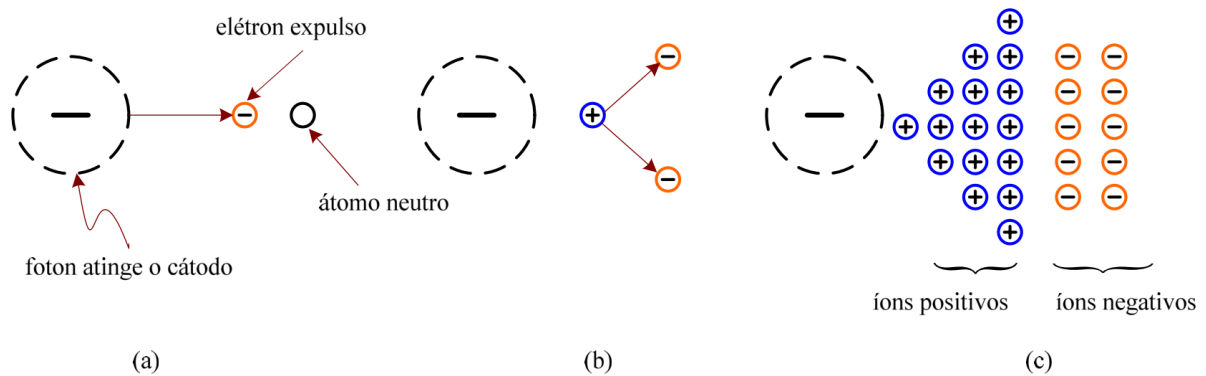
Figura 1. Átomo de um material dielétrico a) Átomo não polarizado. b) Forças no átomo quando submetido a um campo elétrico  $\vec{E}$

Fonte: (CUENCA, 2005)

A Figura 1 ilustra o deslocamento dos elétrons e das cargas positivas que se encontravam em posição de equilíbrio (a), indo para posições mais externas ao átomo (b) devido ao campo elétrico. As cargas positivas (núcleo) ficam sujeitas a forças no sentido do campo elétrico, enquanto que os elétrons por serem cargas negativas estão sujeitos a forças contrárias à direção do campo elétrico, dessa maneira o átomo se comporta como um dipolo (CUENCA, 2005; FAIER, 2006).

Com a intensificação do campo elétrico, resultado este que pode ser obtido, por exemplo, a partir da elevação da diferença de potencial entre os eletrodos, o átomo não será capaz de manter os elétrons da camada de valência presos, sendo arrancado e ficando livre no dielétrico, deixando assim o átomo com mais cargas positivas (ionizado positivamente). Como resultado do processo se tem a liberação de energia podendo culminar em uma descarga.

Na sequência à liberação deste elétron ele pode ser acelerado pelo campo elétrico no qual está inserido e colidir com outros átomos neutros. Caso o campo elétrico possua intensidade superior a um valor crítico, definido pela rigidez dielétrica do meio, o elétron livre será acelerado e a colisão com átomos neutros será capaz de liberar mais elétrons livres. Os elétrons liberados serão acelerados e repetirão o mesmo processo sucessivamente, o que é conhecido como avalanche de elétrons (FAIER, 2006). A Figura 2 apresenta uma ilustração do processo de avalanche de elétrons.



*Figura 2. Processo de avalanche de elétrons iniciado a partir de um eletrodo negativo. (a) Desprendimento e colisão do elétron; (b) formação de um par de elétrons livres – impacto de um elétron com um átomo neutro, um elétron adicional deixa um íon positivo para trás; (c) multiplicação – os elétrons se movem criando íons positivos quando se multiplicam.*

*Fonte: (CUENCA, 2005)*

Considerando que o campo elétrico existente no processo seja resultado da diferença de potencial entre dois eletrodos um positivo e outro negativo, os íons positivos frutos do processo de ionização descrito movem-se a baixas velocidades na direção do eletrodo negativo. Há grande probabilidade que um elétron livre que esteja próximo ao íon seja atraído fazendo com que o átomo volte à condição de neutralidade de carga (FAIER, 2006).

O átomo neutro possui nível de energia inferior ao átomo ionizado positivamente, assim o íon ao retornar à situação de neutralidade libera um quantum de mesma intensidade de energia necessária para deslocar inicialmente o elétron de sua órbita original para fora do átomo. Esta energia é dissipada sob a forma de radiação, gerando assim uma onda eletromagnética.

Os elétrons e íons positivos oriundos deste processo resultam na absorção de potência da fonte fazendo surgir uma centelha entre os eletrodos. Esta centelha caso não atravesse completamente o material dielétrico ligando os dois eletrodos é denominada como descarga parcial (CUENCA, 2005).

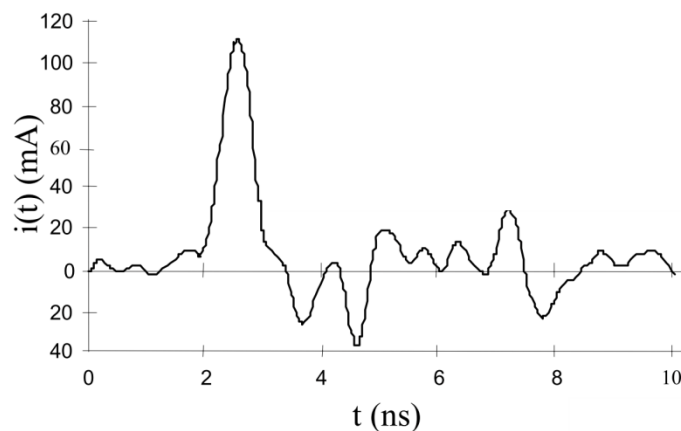
## 2.2 DESCARGAS PARCIAIS

As descargas parciais têm sua terminologia normatizada pela IEC-270 (IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1981) e pela norma brasileira NBR-6940 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1981). Sucintamente define-se descarga parcial como a descarga elétrica que ocorre em

uma região do espaço submetida a um campo elétrico, cujo caminho condutor formado pela descarga não une os dois eletrodos de forma completa (KREUGER, F.H., GULSKI, E. E KRIVDA, 1993).

Segundo Bartnikas (1979), descargas parciais são definidas como sinais pulsantes incompletos, intermitentes e rápidos, que ocorrem pela proximidade entre duas partes condutoras de eletricidade e o meio dielétrico, resultando no efeito de ionização em cavidades presentes no interior dos materiais dielétricos e nas interfaces entre o condutor e o isolante ou entre isolante e o isolante. O tempo de subida do sinal das descargas parciais é da ordem de unidades nano segundos enquanto que sua duração pode chegar a ordem de centenas de nano segundos (BARTNIKAS; MCMAHON, 1979).

A Figura 3 apresenta um exemplo da medição do sinal de descarga parcial, obtido a partir de um pulso de corrente ao longo do tempo. Neste exemplo o sinal da descarga possui duração aproximada de 10 ns (CUENCA, 2005).



*Figura 3. Pulso de descarga parcial medida através da variação da corrente no tempo.*

*Fonte: (CUENCA, 2005)*

A ocorrência de descargas parciais está ligada a existência de imperfeições presentes nos materiais dielétricos resultante de contaminantes e falhas no processo de produção.

As imperfeições mais comuns para o surgimento de descargas parciais em dielétricos sólidos e líquidos é a existência de bolhas e impurezas. Estas imperfeições distorcem o campo elétrico tanto na superfície quanto no interior do dielétrico causando sua intensificação. Quando este valor resultante ultrapassa a

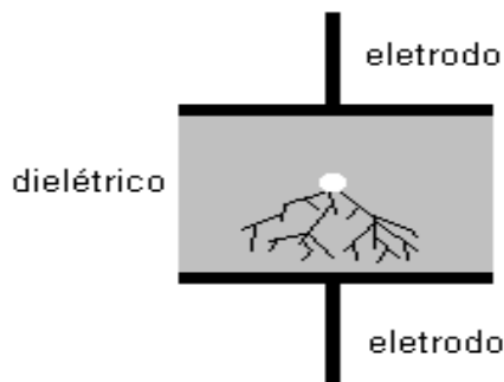


rigidez dielétrica do material, poderá dar início ao fenômeno de descarga parcial (LEMKE et al., 2008; PALITÓ, 2015).

Estas descargas parciais são classificadas em três tipos: internas, superficiais e corona.

As descargas internas ocorrem devido a vazios no interior do material isolante, tais como bolhas, que podem ser geradas durante o processo de fabricação dos componentes isolantes, assim como rachaduras em dielétricos sólidos. Nos dielétricos líquidos bolhas de gases podem ser formadas a partir de fenômenos térmicos e elétricos gerados durante a operação em campo (LEMKE et al., 2008). Estes vazios distorcem o campo elétrico no interior do material gerando micro descargas que vão degradando o isolante até a sua ruptura (AMBRÓZIO; NOVOLAR; MARTIN, 2009; BORGES, 2011).

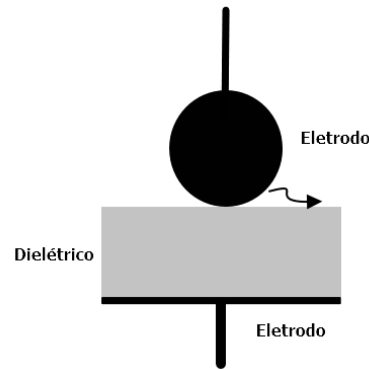
A ocorrência contínua das descargas internas em dielétricos sólidos provocam alterações nas propriedades das superfícies internas dos vazios resultando na quebra das moléculas. Como produto desta reação se tem o início da formação de caminhos condutores, que são conhecidos como arborescência elétrica. A Figura 4 ilustra a evolução de uma descarga parcial interna no dielétrico polimérico com o surgimento de arborescências.



*Figura 4. Ilustração da evolução de uma descarga parcial interna*

*Fonte: (SWINKA FILHO, 2000)*

As descargas parciais superficiais surgem quando a componente de campo elétrico tangente à superfície do material excede o valor crítico ocorrendo assim uma descarga na superfície do dielétrico. Uma representação deste fenômeno pode ser observada na Figura 5.



*Figura 5. Representação da descarga parcial superficial em um material dielétrico*

*Fonte: O autor (2015)*

O depósito de sujeira e poluição sobre a superfície dos isoladores favorece o surgimento destas descargas, pois reduz a intensidade do valor crítico do campo elétrico necessário para promover o efeito. Neste caso é conhecido como o efeito de bandas secas. Este efeito é caracterizado pela passagem de corrente elétrica superficial com alta dissipação de calor resultando na degradação não uniforme do material isolante. Este efeito também é conhecido como trilhamento elétrico (AMBRÓZIO; NOVOLAR; MARTIN, 2009; BORGES, 2011; FAGUNDES, 2008; PORTELLA; ET AL., 2008). A Figura 6 mostra a fotografia de um isolador elétrico retirado de campo devido à degradação por descargas parciais superficiais.



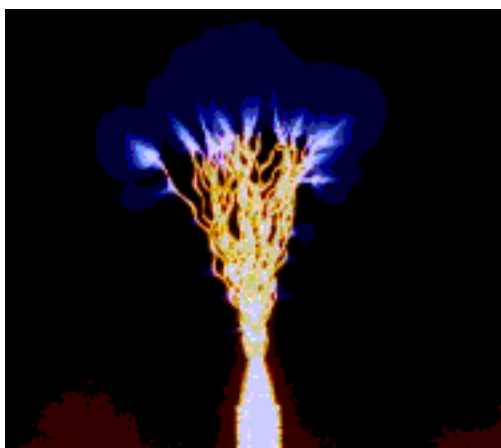
*Figura 6. Isolador retirado de campo devido a degradação por descargas parciais superficiais*

*Fonte: (AMBRÓZIO; NOVOLAR; MARTIN, 2009)*

As descargas parciais do tipo corona são aquelas que ocorrem em meios gasosos a partir de eletrodos condutores pontiagudos energizados, resultando na intensificação do campo elétrico, que quando atinge um valor superior à rigidez

dielétrica do meio resulta no efeito de ionização, mas ainda não o suficientemente intenso para causar um arco elétrico (BORGES, 2011; COSTA, 2007; MUNARO; AL., 2003).

A Figura 7 apresenta uma fotografia de descargas corona a partir da ponta de um eletrodo. Este tipo de descarga ocorre devido a forte concentração de campo elétrico na ponta do eletrodo, que ao superar a rigidez dielétrica do gás presente próximo ao eletrodo gera as descargas.



*Figura 7. Eletrodo com efeito corona*

*Fonte: (SPELLMAN HIGH VOLTAGE ELECTRONICS CORPORATION, [s.d.] )*

A ocorrência de descarga elétrica para um meio gasoso em que haja a presença de oxigênio ( $O_2$ ), poderá ter como subproduto desta reação química o ozônio ( $O_3$ ), em particular materiais poliméricos como os utilizados em isoladores tem o processo oxidativo de degradação acelerado quando expostos ao ozônio, causando o fendilhamento<sup>1</sup> do material, do inglês “*ozone cracking*”.

### 2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados conceitos que contribuem para compreensão dos processos de degradação elétrica em dielétricos como a ionização elétrica e descargas parciais. No próximo capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sobre técnicas para a detecção de rádio interferência e a descrição do conceito de rádio definido por software (RDS).

---

<sup>1</sup> Fendilhamento: Ato ou efeito de fendilhar ou de abrir pequenas fendas, fissurar, rachar.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordada primeiramente uma revisão quanto ao método de detecção e medição de descargas parciais por RFI e, em seguida os conceitos básicos sobre rádio definido por software (RDS), do inglês *Software Defined Radio - SDR*.

#### 3.1 INSPEÇÃO INSTRUMENTAL DE ISOLADORES POR RFI

Quando há o surgimento de descargas parciais em componentes isolantes, observa-se que estes emitem energia nas seguintes formas (PORTUGUÉS et al., 2009; SOUZA NETO et al., 2012; THE PARTIAL DISCHARGE ACADEMY, [s.d.]):

- Emissões eletromagnéticas em forma de radio frequência, luz e calor;
- Emissões acústicas na faixa do audível e ultrassom;
- Ozônio e gases de óxido de nitrogênio.

Os métodos acústicos são baseados na detecção do ruído audível ou ultrassônico resultante da existência de descargas parciais. Os equipamentos desenvolvidos consistem na aplicação de transdutores piezoelétricos na detecção destes ruídos, porém seu maior limitante é a alta sensibilidade a ruídos externos e grande atenuação do sinal acústico com a distância o que inviabiliza em algumas situações a aplicação em campo destes equipamentos de medição (CUENCA, 2005; KOWALSKI et al., 2006).

Em equipamentos que possuam óleo isolante ou isolados a gás a existência de descargas parciais gera reações químicas, cujos subprodutos se acumulam nestes meios durante operações prolongadas, assim a análise química tanto do óleo quanto dos gases pode indicar a existência de descargas parciais e estimar o estado de degradação destes dielétricos (CUENCA, 2005).

Descargas parciais que ocorrem na superfície dos materiais podem ser observadas a olho nu em ambientes escuros ou com a ajuda de binóculos ou câmeras fotográficas. Alternativamente a este método que não é muito eficaz na aplicação em campo devido à dificuldade em se observar estas descargas no espectro do visível, câmeras que detectam radiações no espectro do ultravioleta são utilizadas em inspeções de campo (KOWALSKI et al., 2006). É apresentado na Figura 8 o exemplo do resultado da inspeção de corona por meio de uma câmera ultravioleta. O círculo vermelho da Figura 8 contém a região em que está ocorrendo a descarga parcial.



*Figura 8. Imagem obtida a partir de uma camera ultravioleta*

*Fonte: O autor (2015)*

As descargas superficiais possuem um espectro grande de frequência podendo ser também detectadas na faixa do infravermelho na forma de aquecimento. Com isso as equipes de inspeção têm empregado equipamentos de termovisão em campo a fim de se detectar equipamentos que apresentem aquecimento acima do esperado (KOWALSKI et al., 2006). A Figura 9 ilustra a inspeção do mesmo isolador apresentado na Figura 8, porém utilizando a técnica de termovisão. É possível verificar o aquecimento na mesma região (círculo vermelho) em que a câmera ultravioleta detectou descargas.



*Figura 9. Imagem obtida com um equipamento de termovisão*

*Fonte: O autor (2015)*

Devido às características eletrostáticas das descargas parciais há uma parcela de energia que é radiada na faixa de rádio do espectro de frequências, podendo interferir nos sistemas de telecomunicações.

Um dos primeiros casos do Reino Unido, relatado na bibliografia, em que se correlacionou interferências nos sistemas de comunicação com problemas em equipamentos elétricos foi em 1984 quando um transformador incendiou após a ocorrência da falha em uma de suas buchas. Durante os seis meses que antecederam a falha vizinhos reclamavam de interferências em seus rádios e sinais de TV (PABUNA, 2014).

Sinais eletromagnéticos interferentes nos sistemas de comunicações são conhecidos como Rádio Interferência do inglês RFI – *Radio Frequency Interference*, que por definição é a radiação ou condução de ruído de rádio frequência produzido por equipamentos eletroeletrônicos cujos níveis interferem na operação de equipamentos adjacentes. As frequências de maior interferência são de 10 kHz a 30 MHz para o ruído conduzido e 30 MHz a 1 GHz para o ruído irradiado (CURTIS INDUSTRIES, 2015).

Em laboratório para isoladores e outros equipamentos elétricos de alta tensão são realizados testes normalizados chamados de tensão de rádio interferência (TRI), ou do inglês RIV (*Radio Interference Voltage*) onde avalia-se a intensidade do ruído conduzido gerado por estes equipamentos. No ensaio de TRI é empregado um receptor sintonizado em aproximadamente 1 MHz com banda de 9 kHz. Este receptor é calibrado em microvolts para medir o valor da tensão de entrada do sinal de ruído conduzido pela fonte de alta tensão, sendo este método utilizado para quantificar em laboratório a intensidade do ruído gerado por equipamentos em testes de recebimento e ensaios de tipo (POWER DIAGNOSTIX, 2013).

Para inspeção em campo existem sensores capacitivos e indutivos que são utilizados para medição de descargas parciais em transformadores ou sistemas GIS (*Gas Insulated Switchgear*). A Figura 10 apresenta o exemplo de um transformador de corrente (esquerda) de alta frequência ( $f < 200$  MHz) utilizado para inspeções de descargas parciais em transformadores e a imagem da direita apresenta o exemplo de um sensor capacitivo utilizado em inspeções de subestações GIS.



*Figura 10. Transformador de corrente de alta frequência*

*Fonte: (DOBLE, 2012)*

Um exemplo da inspeção de um transformador em campo utilizando um transformador de corrente de alta frequência conectado ao condutor de terra do transformador é apresentado na Figura 11.



*Figura 11. Exemplo de utilização em campo do transformador de corrente na inspeção de campo.*

*Fonte: (DOBLE, 2012)*

Quanto ao ruído irradiado é encontrado na literatura uma diversidade de faixas de frequência definidas como ótimas para inspeção em campo de descargas parciais. Shibab e Wong (2000) em seus trabalhos utilizaram uma antena bicônica com banda entre 20 MHz e 300 MHz. Para os estudos foram realizados testes em laboratório com isoladores de pino e para-raios de 22 kV, sendo os dados armazenados e tratados posteriormente. Ao final demonstrou-se que inspeções por

rádio frequência podem ser utilizadas como ferramenta de monitoramento e detecção de falhas equipamentos do sistema elétrico como isoladores e para-raios. Ao mesmo tempo se observou que análises de descargas parciais através da transformada de Fourier se mostrou menos eficiente do que análises no domínio do tempo, por sofrer maior interferência de fontes de ruído próximas (SHIHAB; WONG, 2000).

Em trabalho desenvolvido por Muhr e Schwarz (2006), foi constatado a partir da transformada de *Fourier* de sinais de descargas parciais originadas de isolantes poliméricos, que estas possuíam componentes no espectro de frequência até 100 MHz. Ao mesmo tempo Muhr e Schwarz discutiram que em testes de rotina de descargas parciais em subestações isoladas a gás (GIS) utilizam-se equipamentos de medição e análise no domínio do tempo com faixa de operação de até 2 GHz, (MUHR; SCHWARZ, 2006).

A COPEL (Companhia Paranaense de Energia) juntamente com o Instituto de Pesquisa LACTEC (2006) desenvolveu um estudo comparativo entre técnicas de inspeção para isoladores em que se conduziu uma série de testes em campo e laboratório, recomendando que inspeções por RFI devem ser realizadas entre as frequências de 1.8 MHz a 40 MHz, pois apresentaram baixa interferência por ruídos externos (KOWALSKI et al., 2006).

No mercado ainda são encontrados poucos equipamentos desenvolvidos especificamente para inspeção por descargas parciais, sendo que pode-se citar o equipamento RFI Locator modelo 240A produzido pela *Radar Engineers*, que é apresentado na Figura 12, sendo este o equipamento utilizado por Kowalski e demais colaboradores em seus estudos (KOWALSKI et al., 2006).



Figura 12. Equipamento RFI Locator modelo 240A

Fonte: (BORGES, 2011)



A utilização do equipamento *RFI Locator* consiste basicamente na sintonia da frequência em que se deseja observar o sinal e um *display* exibe o sinal detectado no domínio do tempo. A Figura 13 apresenta as imagens do *display* do equipamento produzido pela *Radar Engineers (RFI Locator Model 240A)* durante testes em laboratório. A imagem a) apresenta o ruído de fundo detectado no laboratório enquanto que a imagem b) mostra a radiação detectada irradiada por um isolador corroído. Este equipamento apresenta somente um resultado qualitativo onde a forma do ruído detectado mostrado pelo display de ser interpretada comparativamente a padrões. Este equipamento entre os comerciais é o mais utilizado em função do seu custo, e será a base para o desenvolvimento do protótipo.



*Figura 13. Imagens do display do equipamento RFI Locator durante testes em laboratório detectando DPs de isoladores corroídos. a) ruído de fundo, b) sinal irradiado pelo isolador*

*Fonte: O autor*

Outro equipamento encontrado, o qual foi desenvolvido especificamente para a inspeção de descargas parciais em campo por RF é o PDS 100 produzido pela empresa Doble. Pode ser visto na Figura 14 a utilização em campo do equipamento.



Figura 14. Exemplo de utilização em campo do equipamento PDS 100 (Doble)

Fonte: (DOBLE, 2012)

A documentação fornecida pelo fabricante descreve que o funcionamento básico do equipamento PDS 100 baseia-se em sucessivas varreduras do espectro de frequência, sendo que a medição em campo inicia-se com a obtenção do ruído de fundo (Linha Base) e em seguida o operador percorre a subestação analisando os instantes em que o sinal medido se distancia da linha de ruído de fundo. Um exemplo do gráfico obtido durante a operação do equipamento pode ser observada na Figura 15 (DOBLE, 2012).

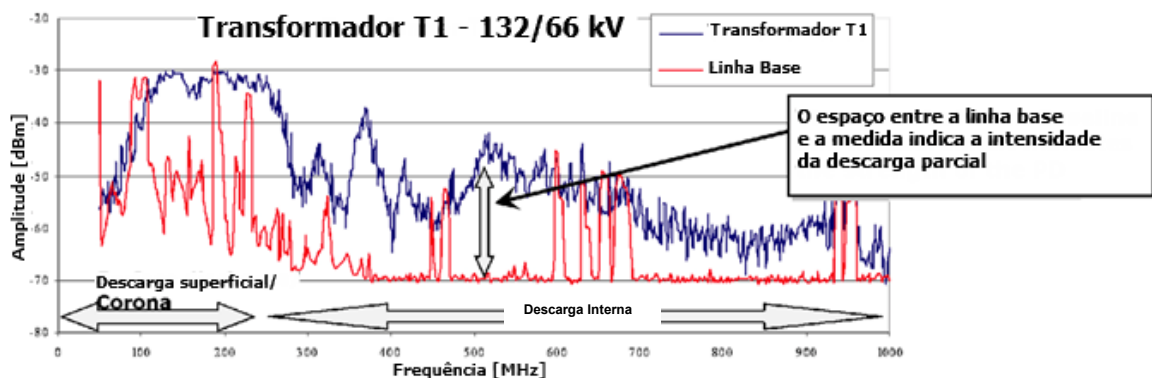


Figura 15. Gráfico de inspeção realizada utilizando o equipamento PDS 100

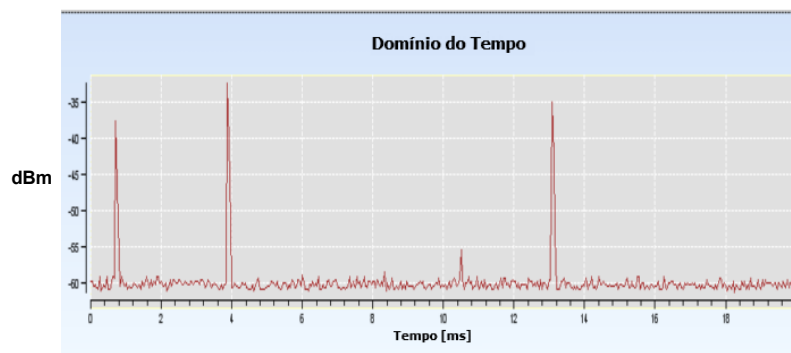
Fonte: Adaptado (DOBLE, 2012)

A curva vermelha (linha base) apresentada na Figura 15 é obtida em uma região fora da subestação e é usada como referência do ruído de fundo onde se considera que há pouca interferência dos sinais de RF gerados por descargas

parciais. Este procedimento deve ser repetido em cada localidade diferente em que uma inspeção será realizada, pois em cada região o espectro de frequências pode apresentar algumas componentes diferentes.

O fabricante de equipamentos Doble (DOBLE, 2012) como exemplificado pela Figura 15 sugere que o espectro de frequência seja dividido em duas partes, sendo a primeira de 0 MHz a 250 MHz onde se tem predominantemente a detecção de ruídos originados por descargas superficiais e corona e a segunda parte do espectro que está compreendida entre 250 MHz e um 1 GHz se tem a predominância de descargas parciais internas.

Trabalhos realizados por Gadhave (2014) apontaram a necessidade da análise no domínio do tempo de descargas parciais, pois observando os sinais no domínio da frequência analisa-se principalmente a intensidade das descargas, enquanto que a quantidade de pulsos no domínio do tempo pode ser, em muitos casos, mais importante para a determinação do estado de degradação de materiais dielétricos (GADHAVE; CHAUDHARI; BANDGAR, 2014). A Figura 16 apresenta um exemplo da detecção de um sinal de DP no domínio do tempo.



*Figura 16. Pico do domínio de frequência(649 MHz) de maior intensidade na faixa de descargas internas convertido para o domínio do tempo, obtido próximo a um comutador com carga (LTC – Load Tap Changer)*

*Fonte: Adaptado (GADHAVE; CHAUDHARI; BANDGAR, 2014)*

Nesbitt *et al.* (2010) conduziu um trabalho utilizando o equipamento da Doble PDS100 na inspeção de uma subestação de 400 kV. A Figura 17 apresenta alguns dos sinais no domínio do tempo obtidos por Nesbitt em seu estudo. Basicamente as curvas “a”, “b” e “c” apresentam sinais obtidos na frequência de 386 MHz e as curvas “d”, “e” e “f” são medidas obtidas na frequência de 179 MHz (NESBITT *et al.*, 2010).

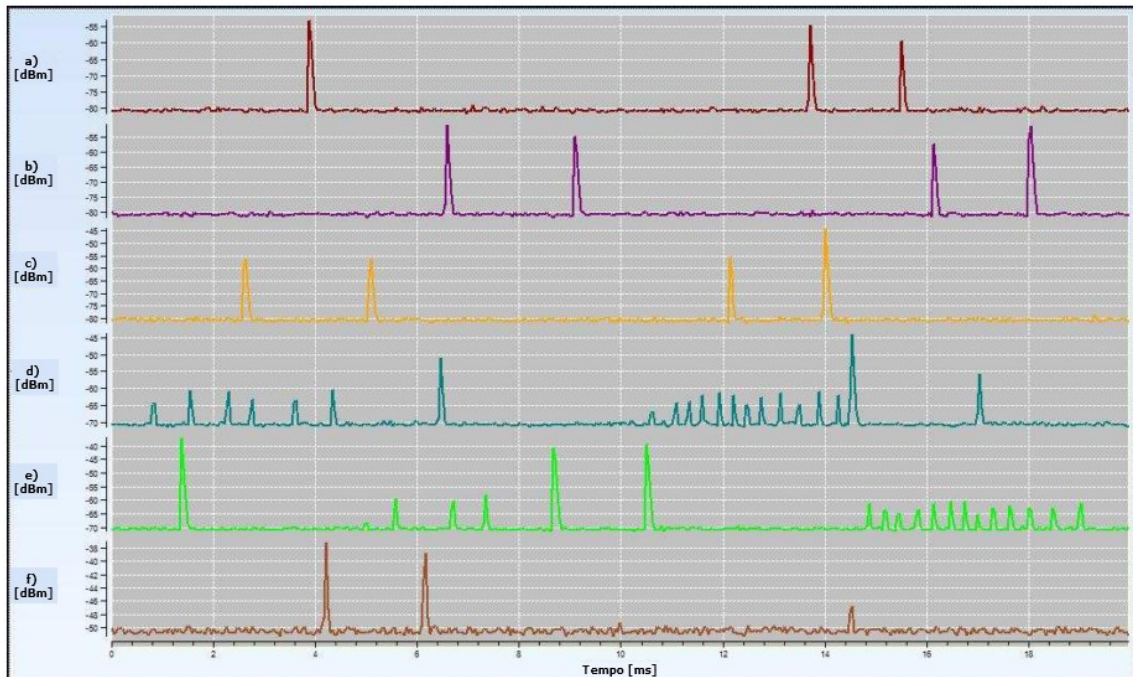


Figura 17. Sinais no domínio do tempo detectados durante inspeções realizadas em uma subestação de 400 kV. a), b) e c) 386 MHz, d) e) e f) 179 MHz. Adaptado de Nesbitt et al. (2010)

Fonte: Adaptado (NESBITT et al., 2010)

Após as inspeções realizadas por Nesbitt et al. (2010), este recomendou a inspeção detalhada de alguns equipamentos da subestação devido à detecção de alterações consideráveis no espectro de frequência em suas proximidades. Na inspeção detalhada realizada posteriormente os operadores detectaram realmente a existência de problemas nos equipamentos recomendados (NESBITT et al., 2010).

Trabalhos desenvolvidos por Borges (2011) e Kowalski et al. (2006) mostraram que em testes realizados em laboratório com isoladores de pino retirados de campo a inspeção por RFI apresentou um desempenho entre 80% e 90% de acerto na detecção de isoladores com problemas (BORGES, 2011; KOWALSKI et al., 2006).

Durante o levantamento bibliográfico vários trabalhos apresentaram propostas de detecção dos sinais de descargas parciais, sendo os métodos de análises dos sinais com resultados aplicados em medições de campo estão ligados a comparação com o ruído de fundo, sempre com o objetivo de se identificar a presença dos sinais de descargas parciais. Nestes casos as análises são do tipo “há DP” ou “não há DP”, devido a dificuldade em se desenvolver um método de análise quantitativo devido as características de aleatoriedade do sinal e

intermitência (ACEVEDO, 2012; KANE et al., 2003; PAOLETTI; GOLUBEV, 1999; WARREN; STONE; FENGER, 2000).

Foram encontrados alguns exemplos de tentativas de aplicação de métodos de análises de sinais, como auto correlação do sinal detectado (CONTIN; PASTORE, 2009), correlação cruzada (ROBLES; FRESNO; MARTÍNEZ-TARIFA, 2015), redes neurais (BARTNIKAS, 2002; HOZUMI; OKAMOTO; IMAJO, 1992; SALAMA; BARTNIKAS, 2002), logica *fuzzy* (SALAMANA; BARTNIKAS, 2000; WENZEL; BORSI; GOCKENBACH, 1994), transformada de *wavelet* (ARORA; VARSHNEY; AGRAWAL, 2014), análise fractal (SATISH; ZAENGL, 1995), tempo vs. Frequência *clustering* (CAVALLINI et al., 2002, 2003), porém todos testes experimentais sem nenhuma aplicação prática, o que comprova a dificuldade quanto a análise autônoma destes sinais.

### 3.2 RDS – RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE

Com o crescimento e popularização dos meios de comunicação, que envolvem diversos tipos de tecnologias e modulações, alterar equipamentos de rádio (transmissor e receptor) de maneira fácil e eficiente se tornou um desafio. A tecnologia de “rádio definido por software” (SDR – *Software Defined Radio*) surgiu em função desta demanda, trazendo flexibilidade, eficiência e baixo custo necessário para a evolução das comunicações (WIRELESS INOVATION, [s.d.]).

Na busca por flexibilidade para aplicações em larga escala, os primeiros a desenvolverem RDSs foram os militares do governo dos Estados Unidos na década de 90 através no programa conhecido como *SpeakEasy* (BARD et al., 2003; MARTINS, 2015). Sendo motivados pela busca de interoperabilidade entre os rádios militares com os de outras agências governamentais, como bombeiros, polícia, e inteligência, pois cada órgão realiza as compras de seus equipamentos de comunicação de maneira independente e assim as tecnologias de comunicação empregadas podem ser incompatíveis (frequência, tipo de modulação de sinais, entre outras).

Assim surgiu o termo “Rádio Digital” utilizado para determinar rádios que podem ser adaptados para diferentes modos operacionais (BARD et al., 2003; SILVA et al., 2015).

A definição de RDS apresentada pelo grupo de trabalho do IEEE P1900.1 diz que um RDS é um rádio onde alguma ou todas suas funções das camadas

físicas são definidas por *software* (IEEE P1900.1, 2007; WIRELESS INOVATION, [s.d.]). Isto significa que suas funções operacionais, tais como filtragens e demodulação, são processadas através de um código de programa, que pode ser alterado mediante a necessidade de evolução ou alteração da tecnologia. Com isso, pode-se utilizar o mesmo *hardware* para diversos tipos de rádio, o que reduz significativamente o custo de produção em larga escala.

Pode-se observar na Figura 18 um exemplo em diagrama de blocos de um sistema de rádio definido por software. No diagrama os blocos da antena, hardware flexível e conversores A/D-D/A compõem o módulo *front-end* de RF, de maneira sucinta o sinal de rádio sintonizado é captado e sua digitalização é deslocada da banda base para frequência intermediária (IF). Sendo todo o processamento subsequente (demodulação, processamento do sinal) realizado via software (LIMA, 2004; MARTINS, 2015).

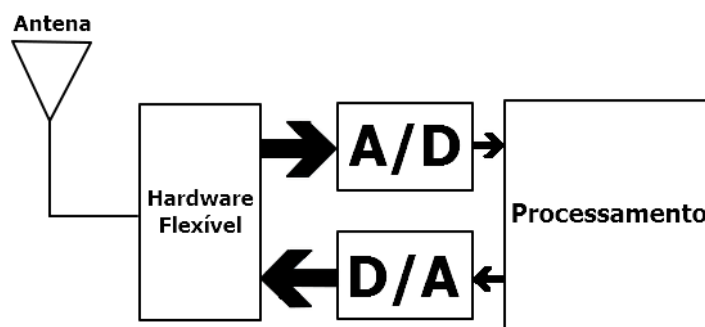


Figura 18. Estrutura básica do RDS

Fonte: O autor

A comparação em diagrama de blocos entre um receptor de rádio AM analógico e um receptor RDS é apresentada na Figura 19. Pode-se observar que a única parte que não se alterou foi a entrada do receptor (antena, filtro de RF, Amplificador de RF), ficando claro também que todo o processo de demodulação do sinal e extração de informação é realizado via software pelo DSP (*Digital Signal Processor*).



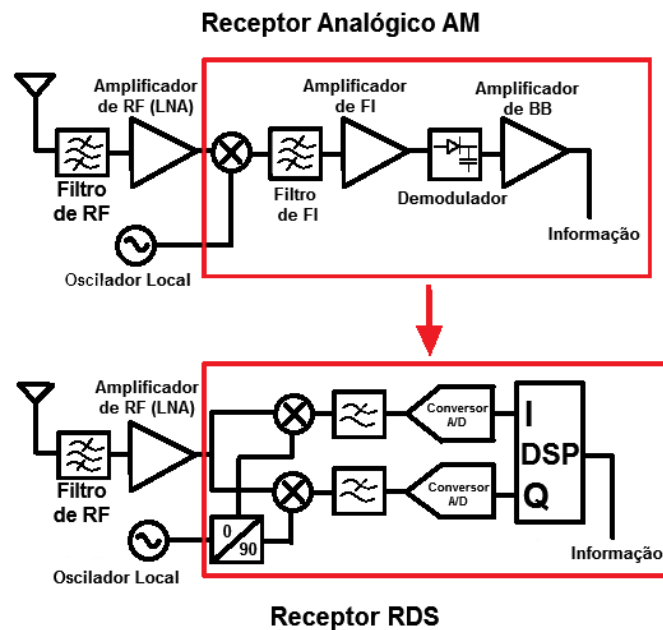


Figura 19. Comparação entre um receptor analógico e um receptor RDS

Fonte: O autor

A utilização de RDSs apresenta vantagens frente as outras tecnologias, como dispositivos evolutivos, pois como a maioria de suas funcionalidades são implementadas em *software*, o dispositivo pode receber atualizações de *software* com correções de *bugs*, mesmo após sua comercialização, assim como atualizações conforme novos padrões de comunicação são liberados (SILVA et al., 2015).

O reuso de *hardware* também é uma das vantagens na utilização de RDSs, pois fabricantes não precisam desenvolver versões de *hardware* diferentes a fim de se enquadrar nas diferentes legislações dos países (esquemas de modulação, formatos de mensagens, faixas de frequência, etc.) reduzindo o tempo de desenvolvimento de soluções. Como exemplo pode-se analisar os diferentes padrões de TV digital adotados no mundo, isso traria um aumento do custo dos equipamentos caso os fabricantes tivessem que desenvolver equipamentos específicos para cada região, porém com a utilização de *hardware* programável as especificidades de cada região podem ser implementadas em *software*, utilizando um única plataforma de *hardware* (SILVA et al., 2015).

Ainda como vantagens pode-se citar a redução da complexidade dos *hardwares*, soluções mais robustas visto que o processamento é realizado digitalmente ficando menos influenciado por variações de temperatura ou envelhecimento dos dispositivos que altera a precisão de componentes analógicos.

Dentre as desvantagens dos RDSs estão o desempenho, sendo sistemas implementados totalmente em *hardware* tendem a superar em desempenho os sistemas baseados em *software*, pois um sistema desenvolvido em *hardware* é otimizado para a tarefa ao qual foi concebido para executar enquanto que o baseado em *software* é empregado em um dispositivo genérico requerendo mais ciclos de processamento para executar a mesma operação (SILVA et al., 2015). De maneira prática *switches* baseados em *hardware* podem chegar a processar até dez vezes mais pacotes que os implementados em *software* (INTEL, 2013).

### 3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas uma breve revisão sobre os métodos de detecção instrumentalizada de descargas parciais de componentes da rede elétrica, detalhando o método de detecção por rádio interferência e apresentando alguns equipamentos comerciais.

Também foram introduzidos os conceitos de RDS, sendo esta a solução escolhida para o desenvolvimento do protótipo descrito nos próximos capítulos. O capítulo 4 irá apresentar a metodologia adotada e os materiais e equipamentos utilizados no desenvolvimento do trabalho.



## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Baseando-se na contextualização apresentada nos capítulos anteriores acerca de falhas em dielétricos por descargas parciais e a identificação de equipamentos com problemas através da detecção de componentes de rádio frequência originadas por estas descargas, se propôs o desenvolvimento de um protótipo de baixo custo para a inspeção em campo de equipamentos elétricos que apresentem DPs.

Devido a importância da reprodutibilidade dos resultados em trabalhos futuros, neste capítulo serão descritos os materiais e equipamentos utilizados no desenvolvimento do protótipo proposto assim como a descrição dos métodos adotados durante o processo.

### 4.1 MÉTODOS

O desenvolvimento do protótipo seguiu basicamente a seguinte estrutura:

1. Testes preliminares para caracterização dos sinais de RF seção 5.1;
2. Proposta de solução e especificação do *hardware* seção 5.2;
3. Desenvolvimento e testes iniciais seção 5.3;
4. Validação em laboratório seções 5.4 e 5.5.

#### 4.1.1 TESTES PRELIMINARES PARA CARACTERIZAÇÃO DOS SINAIS DE RF

Os testes preliminares consistiram da realização de ensaios de tensão aplicada em laboratório em isoladores de vidro do tipo disco. Os ensaios foram realizados com o intuito de se detectar sinais de RF de descargas parciais utilizando uma antena conectada à entrada de um osciloscópio para aquisição do sinal e posterior análise levantando características no domínio da frequência dos sinais, o trabalho desenvolvido está descrito na seção 5.1.

#### 4.1.2 PROPOSTA DE SOLUÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DO *HARDWARE*

Após levantamento das características dos sinais de RF das descargas parciais, foram buscados no mercado dispositivos de baixo custo que pudessem compor uma solução que atendesse as necessidades exigidas para a detecção dos sinais estudados, os equipamentos encontrados estão descritos na seção 5.2.

#### 4.1.3 DESENVOLVIMENTO E TESTES INICIAIS

Com a proposta de solução definida e os dispositivos comprados iniciou-se o desenvolvimento do *software* que integrou o protótipo.

Paralelamente ao desenvolvimento se tem a realização de testes iniciais que consistem em ensaios de laboratório de tensão aplicada em isoladores, com o objetivo de amparar o desenvolvimento do protótipo e aperfeiçoamento da solução, sendo este desenvolvimento descrito na seção 5.3.

#### 4.1.4 VALIDAÇÃO EM LABORATÓRIO

A validação em laboratório consistiu dos testes finais do protótipo a fim de comparar os resultados obtidos através da solução desenvolvida com a resposta de um equipamento comercial. Para tal foram realizados ensaios de caracterização da sensibilidade, largura de banda e janela de amostragem de ambos os equipamentos, assim como testes comparativos quanto a detecção de DPs com os equipamentos, sendo o trabalho desenvolvido apresentado em detalhe nas seções 5.4 e 5.5.

### 4.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Nesta seção serão apresentados os materiais e equipamentos utilizados no auxílio do desenvolvimento do trabalho.

#### 4.2.1 OSCILOSCÓPIOS

Para aquisição de sinais durante o desenvolvimento do trabalho, foram utilizados os osciloscópios das marcas *Tektronix* do modelo MSO 2012B (Figura 20a), tendo como configurações básicas do modelo banda de 100 MHz, 1 GS/s de taxa de amostragem e 1 M pontos (amostras) e Agilent modelo DSO-X 2002A (Figura 20b) com banda de 70 MHz, 2 GS/s e 1 M pontos (amostras).



a)

b)

Figura 20. a) Osciloscópio Tektronix modelo MSO 2012B e b) Osciloscópio Agilent modelo DSO-X 2002A

Fonte: (AGILENT TECHNOLOGIES, 2012; TEKTRONIX, [s.d.])

#### 4.2.2 GERADOR DE SINAIS DE RF

Para a caracterização da interface do RDS e do equipamento comercial de RFI foi utilizado o gerador de sinais de RF da marca *Agilent* modelo E4432B. Este é apresentado na Figura 21.



Figura 21. Gerador de sinais de RF Agilent E4432B

Fonte: (KEYSIGHT TECHNOLOGIES, [s.d.])

#### 4.2.3 ANTENA

Nos testes e ensaios realizados envolvendo a captação de sinais de rádio frequência, utilizou-se uma antena monopolo (omnidirecional) da marca LARSEN modelo NMOQ semelhante a apresentada na (Figura 22). Esta antena foi selecionada por ser a mesma utilizada em equipamentos comerciais de detecção de RFI.



*Figura 22. Antena da marca LARSEN modelo NMOQ*

*Fonte: (BORGES, 2011)*

#### 4.2.4 EQUIPAMENTO COMERCIAL DE RFI

Para que se tivesse um parâmetro de comparação de resultados se utilizou o equipamento de RFI produzido pela *Radar Engineers* modelo *RFI Locator 240A* que possui faixa de operação de 1,8 MHz a 1 GHz. Este é apresentado na Figura 23.



*Figura 23. Equipamento RFI Locator modelo 240A*

*Fonte: O autor*

#### 4.2.5 FONTE DE ALTA TENSÃO

Nos testes se utilizou a fonte de alta tensão da marca *BIDDLE* com tensão máxima 200 kV, potência 20 kVA e frequência 60 Hz, sendo esta apresentada na Figura 24.



*Figura 24. Fonte de alta tensão BIDDLE usado nos experimentos de tensão aplicada em laboratório.*

*Fonte: O autor*

#### 4.2.6 ISOLADORES

Para geração dos sinais de RF originados de descargas parciais foram utilizados isoladores de vidro do tipo disco e isoladores poliméricos. Um dos isoladores de vidro utilizados está apresentado na Figura 25.



*Figura 25. Isolador de vidro do tipo disco*

*Fonte: O autor*

Para condição de isolador sem defeito, foram utilizados isoladores novos. Para a geração de descargas parciais foram utilizados isoladores com o pino corroído como o apresentado na Figura 26.



*Figura 26. Isolador de vidro com o pino corroído*

*Fonte:O autor*

Nos testes de validação do protótipo desenvolvido também se utilizou um isolador polimérico de rede de 34,5 kV para geração de descargas parciais, este pode ser visualizado na Figura 27.



*Figura 27. Isolador polimérico rede 34,5 kV*

*Fonte:O autor*

Para o caso em questão foi realizado o descolamento do polímero externo do núcleo interno e injetado um solução salina para que induzisse o surgimento de descargas parciais.

#### 4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresentou-se a metodologia adotada no desenvolvimento do protótipo assim como os materiais e equipamentos utilizados no processo. No próximo capítulo é apresentado o desenvolvimento do protótipo.

## 5 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Para o desenvolvimento deste trabalho foram realizadas as seguintes etapas:

- Caracterização das componentes de RF das descargas parciais em isoladores de vidro do tipo disco;
- Especificação dos componentes:
  - RDS;
  - Computador de baixo custo;
- Implementação da solução proposta, desenvolvimento do protótipo;
- Testes em laboratório.

### 5.1 TESTES PRELIMINARES PARA CARACTERIZAÇÃO DOS SINAIS DE RF

Para definir quais métodos de análise, medição e detecção seriam mais adequados à identificação das descargas parciais nos isoladores, fez-se necessário a caracterização do sinal interferente. Para isto foi montado o arranjo de ensaio como mostra na Figura 28, o qual consistiu em um isolador de vidro do tipo disco com a campanula (parte superior) aterrada e uma tensão elétrica em corrente alternada de frequência 60 Hz aplicada na parte inferior (pino).



*Figura 28. Arranjo de ensaio*

*Fonte: O autor*

Os sinais de rádio frequência foram amostrados no domínio do tempo através de um osciloscópio digital com o auxílio de uma antena monopolo colocada a uma distância de cinco metros do isolador.

Foram coletados dados para dois isoladores, sendo um novo e outro com processo de corrosão em estado avançado. Os sinais foram transformados para o domínio da frequência aplicando-se a transformada de *Fourier*, a fim de se observar as características em frequência.

O exemplo do sinal de descarga parcial medido no domínio do tempo das descargas parciais é apresentada na Figura 29.

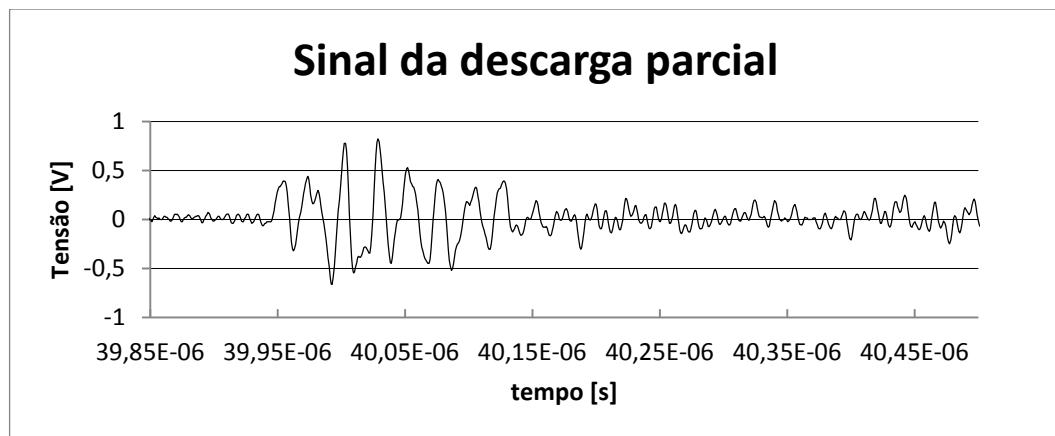


Figura 29. Sinal de descarga parcial no domínio do tempo medido com uma antena

Fonte: O autor

As Figura 30 e Figura 31 apresentam as comparações do sinal medido no domínio da frequência (curva preta) confrontado com o ruído de fundo (curva vermelha) respectivamente para o isolador novo submetido a uma tensão de 20 kV e o isolador corroído submetido a tensão de 20 kV.



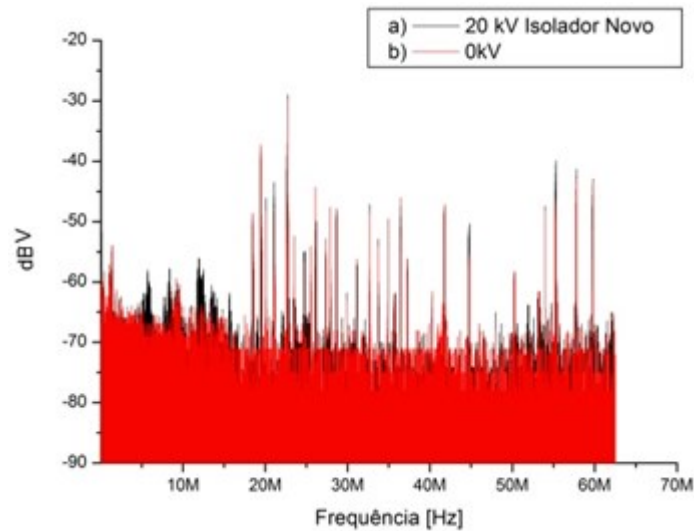


Figura 30. Espectro de frequência obtido com um isolador novo em duas condições de tensão aplicada, 20 kV (a) e 0 kV (b)

Fonte: O autor

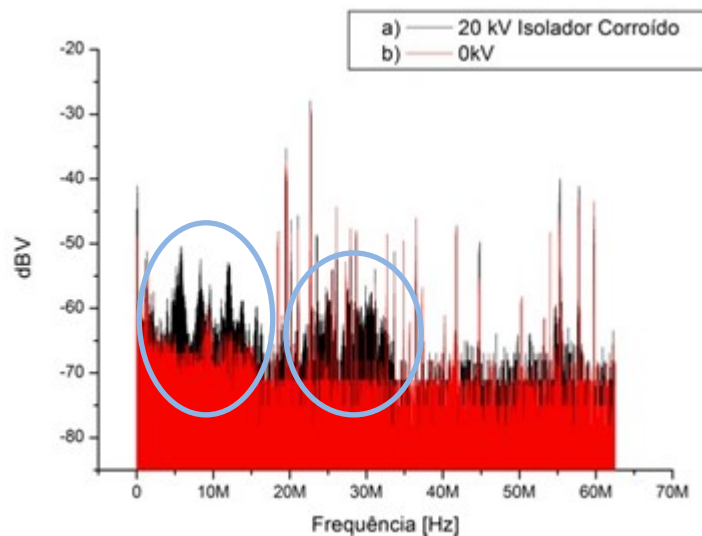


Figura 31. Espectro de frequência obtido com um isolador corroído em duas condições de tensão aplicada, 20 kV (a) e 0 kV (b)

Fonte: O autor

A Figura 30 mostra que para o isolador novo quando submetido a tensão de 20 kV não se detectou alteração no espectro de frequência quando comparado com o ruído de fundo medido antes do início do ensaio. No entanto ao observar o gráfico da Figura 31 para o isolador corroído se constatou alterações em algumas faixas de frequência como 10 MHz e de 30 MHz. Estas áreas estão destacadas com um círculo azul no gráfico da Figura 31.

Vale salientar que os resultados encontrados nesta etapa não são absolutos, mas sim complementares a fim de nortear o desenvolvimento do protótipo, pois, como apresentado por Borges (2011) e Kowalski *et. al.* (2006) detectores de RFI sintonizados na frequência de 40 MHz apresentaram bom desempenho em inspeções de campo, enquanto que o fabricante de equipamentos de medição DOBLE afirma que há diferentes regiões no espectro em que cada tipo de descarga parcial se manifesta (BORGES, 2011; DOBLE, 2012; KOWALSKI *et al.*, 2006) justificando a necessidade do equipamento de medição poder operar em uma faixa grande de frequência.

## 5.2 PROPOSTA DE SOLUÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DOS *HARDWARES*

### 5.2.1 ESPECIFICAÇÃO DO RDS

Através dos resultados descritos no item anterior buscou-se no mercado dispositivos RDS que atendessem algumas destas faixas de frequência. Dentre os equipamentos de baixo custo apresentado na Tabela 1, encontrou-se o dispositivo USB de interface RDS que utiliza os circuitos integrados (CIs) R802T e RTL2832 a um custo aproximado de US\$ 15,00, sendo este o escolhido para o desenvolvimento do presente trabalho devido o seu baixo custo.

*Tabela 1. Dispositivos RDS de baixo custo encontrados no mercado*

*Fonte: Adaptado de (RTL-SDR, [s.d.])*

<b>RDS</b>	<b>Frequência mínima (MHz)</b>	<b>Frequência máxima (MHz)</b>	<b>Largura de banda (MHz)</b>	<b>Resolução do conversor AD (Bits)</b>	<b>Preço (\$USD)</b>
RTL-SDR (R820T)	24	1766	3.2	8	~15
Funcube Pro+	0.15	260	0.192	16	~200
	410	2050			
Airspy	24	1800	10	12	199
SDRPlay	0.1	2000	8	12	149
HackRF	30	6000	20	8	299
BladeRF	300	3800	40	12	400 & 650
USRP 1	DC	6000	64	12	700

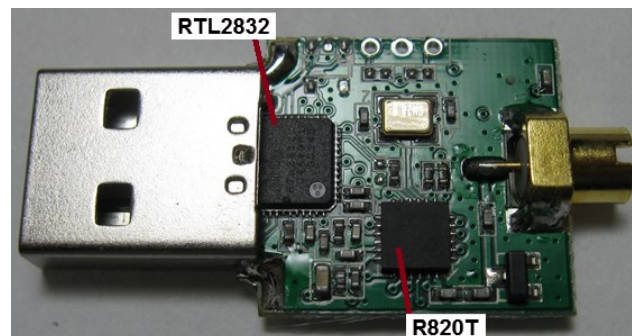
O dispositivo escolhido, que pode ser observado na Figura 32 e Figura 33, possui faixa de operação entre 24 MHz e 1850 MHz, dimensões reduzidas e baixo custo.



*Figura 32. Interface RDS - RTL2832 e R802T*

*Fonte: (SUPERKUH, 2015)*

A Figura 33 apresenta a interface USB do RDS com a cobertura plástica removida com a indicação da posição dos dois circuitos integrados R820T e RTL2832.



*Figura 33. Hardware aberto com a indicação dos componentes*

*Fonte: Adaptado de (SUPERKUH, 2015)*

Na sequência são discutidas as características encontradas na literatura sobre os CIs RTL2832 e R820T.

### 5.2.1.1 CI R820T – HIGH PERFORMANCE LOW POWER ADVANCED DIGITAL TV SILICON TUNER

O circuito integrado R820T é produzido pela empresa taiwanesa Rafael Micro, sendo este CI, responsável pela sintonia das faixas de frequência e misturador. Inicialmente este foi concebido para aplicações de TV digital como mostra a Figura 34 onde apresenta a aplicação do sintonizador R820T em um receptor de TV digital para PC (PCTV) (RAFAEL MICRO, 2011).

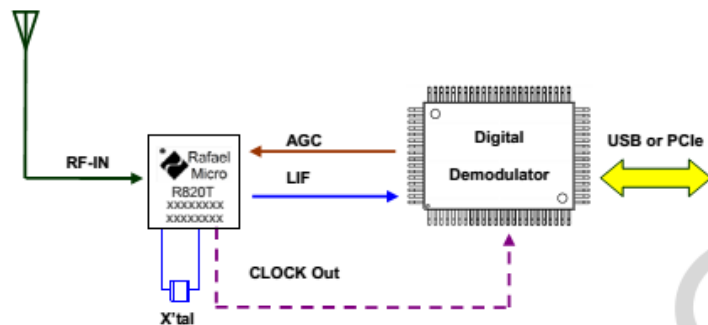


Figura 34: Exemplo de aplicação de receptor de TV digital para PCTV

Fonte: (RAFAEL MICRO, 2011)

O R820T recebe o sinal de RF que passa por um amplificador de baixo ruído, detector de potência, um filtro passa faixa e um filtro de rejeição de imagem. O misturador converte o sinal de RF para uma frequência intermediária mais baixa do que a sintonizada, este processo pode ser observado na Figura 35 que apresenta o diagrama de blocos do CI.

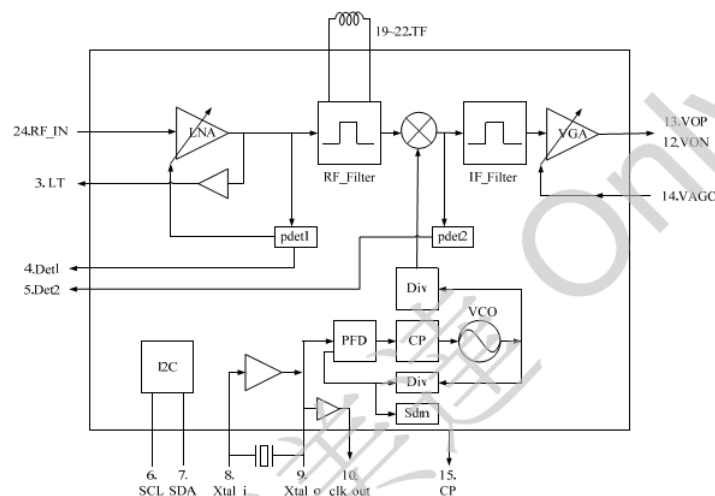


Figura 35: Diagrama de blocos simplificado do R820T

Fonte: (RAFAEL MICRO, 2011)

Pode ser observado na Tabela 2 as características básicas do R820T (*Typical Figures*) do CI obtida a partir do *datasheet* fornecido pelo fabricante, assim como os dados obtidos através de outros materiais relacionados a aplicação do CI em dispositivos comerciais. São apresentados os dados de aplicações comerciais encontradas na literatura, pois estas divergem do exposto no manual do fabricante, sendo relatado que dispositivos que possuem o CI R820T apresentam como faixa de operação entre 24 MHz e 1850 MHz (MARTINS, 2015; RTL-SDR, [s.d.]; SUPERKUH, 2015).

*Tabela 2: Valores típicos*

*Fonte: Adaptado de (RAFAEL MICRO, 2011; RTL-SDR, [s.d.]; SUPERKUH, 2015)*

	Datasheet	Outros materiais
Faixa de Frequência:	42 MHz a 1002 MHz	24 MHz a 1850 MHz
Noise figure	3.5 dB @ RF_IN	
Phase noise	-98 dBc/Hz @ 10 kHz	
Current consumption	<178 mA @ 3.3V power supply	
Max input power	+10 dBm	
Image Rejection	65 dB	

A Tabela 3 apresenta a banda do canal e a frequência intermediária (Frequência central) para o R820T em relação a alguns padrões de TV digital. A partir da tabela verifica-se que a frequência intermediária do CI varia entre 3,57 MHz e 4,57 MHz dependendo do padrão de TV digital e banda do canal.

*Tabela 3: Frequências intermediárias*

*Fonte: (RAFAEL MICRO, 2011)*

	Padrão de TV	Canal BW	Frequência central
1	ATSC ( Digital)	BW = 6MHz	Fcenter= 4.063MHz
2	DVB-T ( Digital)	BW = 6MHz	Fcenter= 3.57MHz
3	DVB-T ( Digital)	BW = 7MHz	Fcenter= 4.07MHz
4	DVB-T ( Digital)	BW = 7MHz	Fcenter= 4.57MHz
5	DVB-T ( Digital)	BW = 8MHz	Fcenter= 4.57MHz
7	ISDB-T ( Digital)	BW = 6MHz	Fcenter = 4.063MHz
8	DTMB ( Digital)	BW = 8MHz	Fcenter= 4.57MHz

O R820T foi concebido com RFAGC (*Radio Frequency Automatic Gain Control*) para alcançar uma ótima relação sinal ruído enquanto minimiza a distorção

do sinal. Quando o sinal de entrada de RF aumenta, o detector de potência interno é ativado para atenuar o ganho do amplificador interno de baixo ruído para um nível ótimo. Enquanto que ao reduzir a da potência do sinal de entrada, o detector de potência interno aumentará o ganho do amplificador de baixo ruído (RAFAEL MICRO, 2011).

#### 5.2.1.2 CI RTL2832U - DVB-T COFDM *Demodulador* + USB 2.0

O RTL2832U é um CI produzido pela *Realtek Corporation* como interface para demodulação, amostragem e transmissão dos dados amostrado através de um barramento USB. Sendo uma de suas aplicações receptores portáteis de TV digital.

Principais Características:

- Suporta múltiplas frequências de IF (4,57 MHz ou 36,167 MHz) e inversão de espectro;
- Inclui suporte de rádio (FM/DAB/DAB+);
- Inclui ISDB-T(SBTVD-T) 1-seg;
- Suporta Zero-IF;
- Modo de transmissão automática;
- 8-bit ADC para medidas de sinais de RF;
- Hardware MPEG-2 PID filtros;
- Porta de infra vermelho para controle remoto e acordar dispositivo.

Protocolos suportados:

- Protocolo Microsoft RC6
- NEC, Sony, SIRC, RC-5 protocolo
- Oito portas I/O para uso geral
- Interface USB2.0
- Configurável através de EEPROM externa
- Certificação USB-IF

#### 5.2.2 CARACTERIZAÇÃO EM LABORATÓRIO DA INTERFACE RDS

O dispositivo RDS foi submetido a testes de laboratório a fim de caracterizá-lo quanto a sensibilidade, largura de banda e linearidade em amplitude. Primeiramente realizou-se o teste de sensibilidade, que por definição é a menor quantidade mensurável por um instrumento particular (THOMSEN, 1997). Vale

salientar que neste caso não existe modulação do sinal de entrada, de modo que a sensibilidade pode ser medida diretamente sobre o sinal resultante da aquisição.

Para este teste foi conectado à entrada da interface um gerador de RF variando-se a intensidade do sinal (40 Mhz) aplicado na entrada até que o sinal se sobressaísse ao ruído de fundo. O gráfico resultante dos testes pode ser observado na Figura 36, que foi obtido através do *software* “SDR#”.

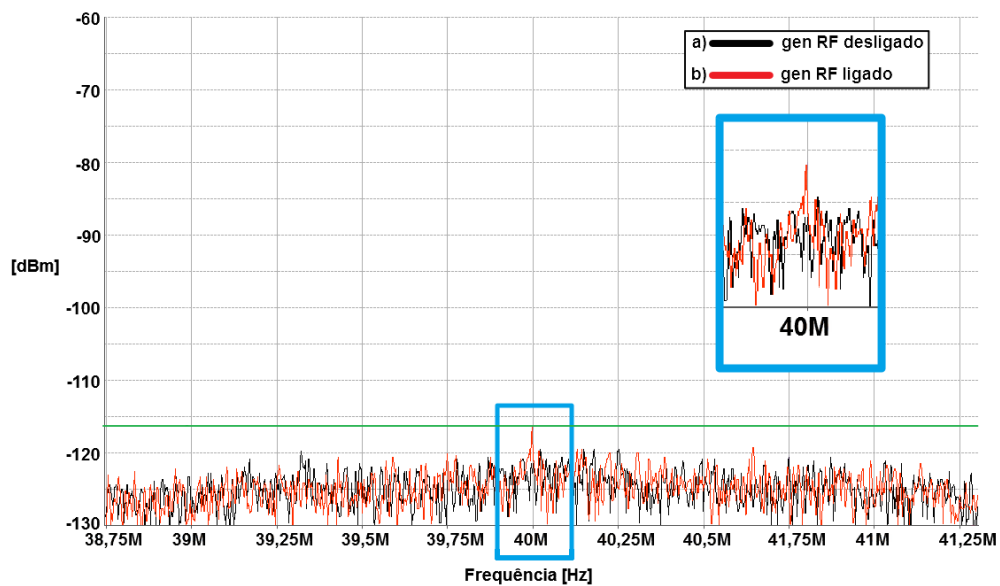


Figura 36: Teste de sensibilidade do RDS, curvas a) sem sinal na entrada do RDS – ruído de fundo e b) sinal aplicado de -118 dBm em 40 MHz

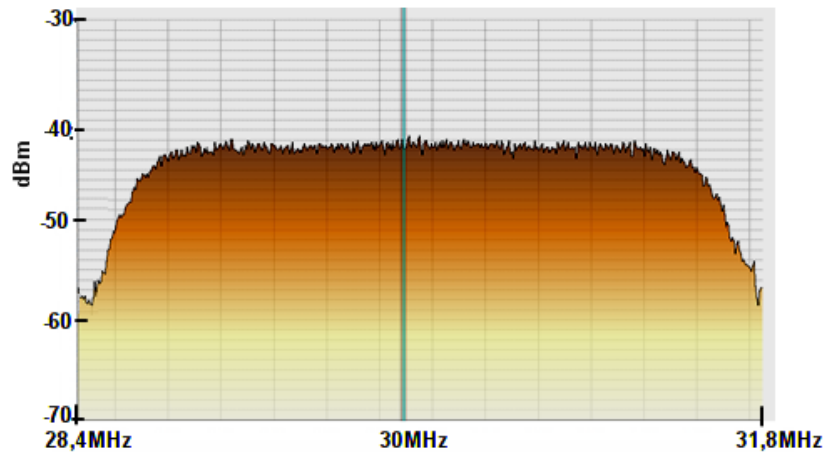
Fonte: O autor

Com apresentado na Figura 36 a menor intensidade de sinal que se destaca do ruído de fundo é -118 dBm, determinando este valor como a sensibilidade do dispositivo.

Em seguida se levantou a resposta em frequência do dispositivo nas faixas de interesse de 30 MHz e 40 MHz, devido as divergências encontradas na literatura quanto a frequência mínima de operação do dispositivo, pois as frequências de interesse (30 MHz e 40 MHz) estão próximas ao limite inferior de operação do dispositivo (RAFAEL MICRO, 2011; RTL-SDR, [s.d.]; SUPERKUH, 2015).

Para tal conectou-se diretamente a entrada do dispositivo a um gerador de sinais de RF configurado para efetuar varreduras em frequência. A Figura 37 apresenta a resposta em frequência para o dispositivo sintonizado na frequência de

30 MHz com banda máxima disponível (3,4 MHz). Os testes foram realizados com um PC utilizando o *software* “SDR#” (AIRSPY, 2015).



*Figura 37: Resposta do RDS a um sinal de -50 dBm na faixa de frequência de 28,4 MHz a 31,8 MHz. O sinal medido no centro da faixa (30,1 MHz) foi de -42 dBm, indicando um erro de 8 dBm em relação ao sinal injetado*

*Fonte: O autor*

Identificou-se que para a janela de amostragem de 3,4 MHz houve uma atenuação nos extremos, resultando em uma resposta linear para a faixa central de  $\pm 1,3$  MHz (banda de 2,6 MHz). Este resultado se torna ainda mais relevante ao conflitar diretamente com o descrito pelos fabricantes em seus manuais que apontam como principal aplicação dos CIs em receptores de TV digital, porém para esta aplicação por exemplo no Brasil o receptor necessitaria de uma banda de 6 MHz.

Para o teste de linearidade em amplitude do RDS, na frequência de 40 MHz variou-se a amplitude do sinal injetado pelo gerador de sinais de -70 a -10 dBm. Realizou-se a comparação dos valores injetados com os obtidos pelo RDS através do *software* “SDR#”, sendo este resultado apresentado no gráfico da Figura 38.



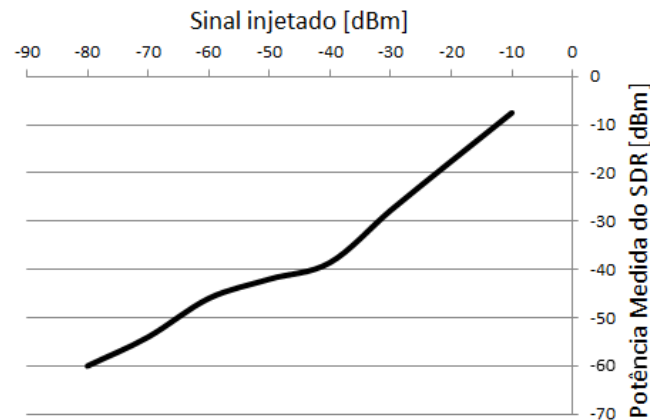


Figura 38: Curva de linearidade em amplitude do RDS na frequência de 40 MHz

Fonte: O autor

A partir do gráfico da Figura 38 pode-se observar que o sinal medido pelo RDS possui boa linearidade na faixa de -40 a -10 dBm. Na faixa de -70 a -40 dBm há uma pequena não linearidade o que não impacta na detecção das descargas parciais.

### 5.2.3 COMPUTADOR DE BAIXO CUSTO

Para o controle da interface RDS e tratamento dos dados se faz necessário o uso de um computador. Como o objetivo é o desenvolvimento de uma solução portátil e de baixo custo foram levantados alguns modelos no mercado, sendo os três modelos mais baratos encontrados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Computadores de baixo custo

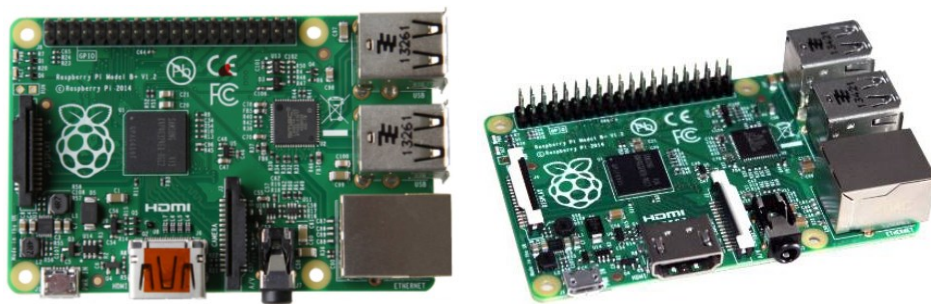
Fonte: Adaptado de (ATWELL, 2013; ELEMENT14, 2014)

	Processador	Memória RAM	Armazenamento	Postas USB 2.0	Conector de Vídeo	Preço (\$USD)
Raspberry Pi B+	700 MHz	512 MB	16 GB (cartão MicroSD)	4	Sim	39,33
BeagleBone Black	1 GHz	512 GB	4 GB	1	Não	56,95
Hackberry	1,2 GHz	512 GB	4 GB	2	Sim	65,00

Para o desenvolvimento do protótipo escolheu-se o mini computador *Raspberry Pi* modelo B+ (Figura 39), por possibilitar a conexão direta com um monitor via HDMI, possuir 4 portas USB que possibilita a conexão de equipamentos

com *mouse* e teclado que facilitam o desenvolvimento, assim como apresentou o menor custo dentre os equipamentos encontrados.

As características básicas deste computador são: 512 MB de memória RAM, processador ARM11 (Broadcom BCM2835 ARMv6) de 700 MHz, quatro portas USB 2.0 (60 MBps), 40 pinos GPIO (General Purpose Input/Output) e o armazenamento é realizado em um cartão MicroSD.



*Figura 39. Raspberry Pi 1 Modelo B+*

*Fonte: (ELEMENT14, 2014)*

Considerando que a comunicação entre a interface RDS e o mini computador é realizada por meio de uma porta USB 2.0, cuja velocidade de transmissão efetiva é de 35 MBps e que a interface realiza amostragens complexa (I e Q) de 1 byte cada totalizando 2 bytes por amostra, a banda máxima que este dispositivo poderia operar seria em 17,5 MHz, caso o fator limitante fosse a taxa de transferência de dados da porta USB. No entanto como demonstrado anteriormente, a banda do sistema é limitada pela interface RDS em 3,4 MHz (máximo efetivo 2,6 MHz) (COMPAQ et al., 2000).

### 5.3 DESENVOLVIMENTO E TESTES INICIAIS

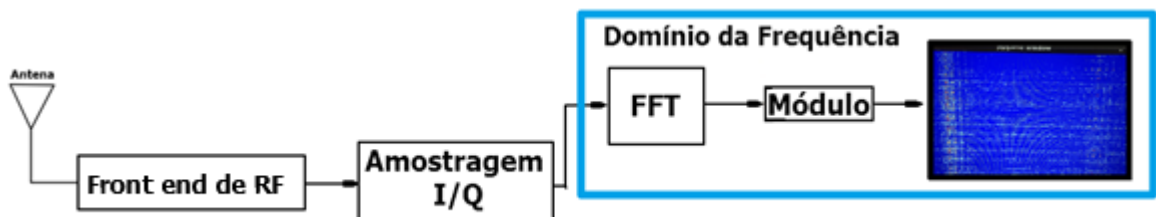
Após validação das características do dispositivo de interface do sistema RDS, iniciou-se a fase de implementação do sistema completo utilizando o RDS conectado através da interface USB, como mostrado na Figura 40. Foi realizado o estabelecimento da comunicação entre os dispositivos e operação via software embarcado no próprio *Raspberry Pi*.



*Figura 40: Raspberry Pi Modelo B+ com a interface RDS*

*Fonte: O autor*

Com base nos resultados obtidos na fase de caracterização do sinal se explorou a análise das descargas parciais no domínio da frequência, o diagrama de blocos que demonstra esta solução pode ser observado na Figura 41. Diagrama de blocos da análise no domínio da frequência. Foram realizados testes de detecção do efeito corona em isoladores empregando o sistema de medição desenvolvido para comprovação da aplicabilidade do conjunto na detecção de descargas parciais.



*Figura 41. Diagrama de blocos da análise no domínio da frequência*

*Fonte: O autor*

Nos testes realizados a descarga corona foi produzida em um arranjo de ensaio constituído por uma ponta energizada com um potencial de 27 kV contra um plano aterrado, como mostrado na Figura 42.

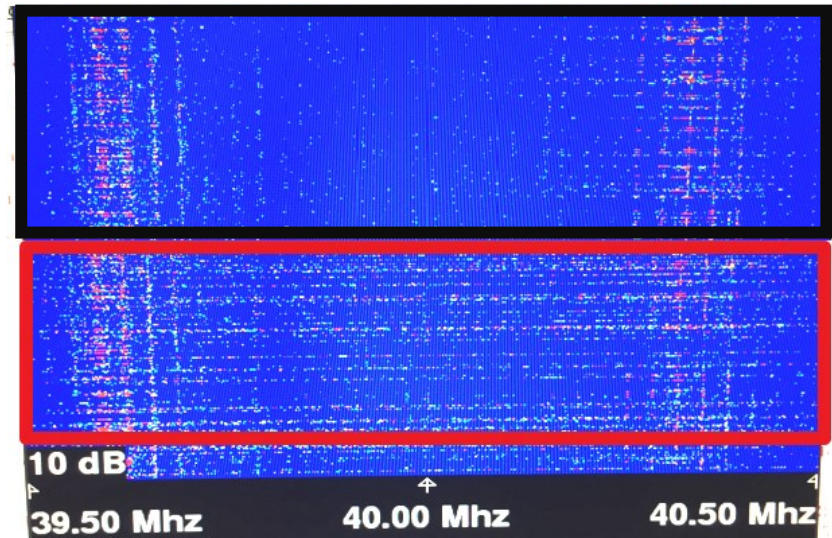


*Figura 42. Arranjo de ensaio de geração de corona pontaxplano*

*Fonte: O autor*

Configurou-se o sistema para detecção em gráfico *Waterfall* (espectrograma) no domínio da frequência, ajustando os valores de ganho e limites para que fosse possível a detecção do ruído. O dispositivo foi sintonizado na frequência de 40 MHz com uma banda de 1 MHz. Neste ensaio utilizou-se a antena monopolo conectada ao RDS.

A Figura 43 apresenta o espectrograma codificado em cores (azul: menor amplitude, vermelho: maior amplitude) da medição durante o ensaio de corona utilizando o sistema desenvolvido (interface RDS + *Raspberry Pi*). O processamento gráfico dos dados é feito no próprio *Raspberry Pi*, que gera uma saída de vídeo no padrão HDMI onde se conectou um monitor. A região do gráfico contida no retângulo preto indica as medições do ruído de fundo sem a presença de corona, enquanto que a região contida no retângulo vermelho representa a medição do efeito corona durante o ensaio.



*Figura 43: Espectrograma (frequência x tempo) do ruído captado sem (região superior) e com (região inferior) a presença de descargas parciais*

*Fonte: O autor*

Analisando o espectrograma da Figura 43 é possível observar que quando as descargas corona foram iniciadas, na região central do gráfico há o aumento significativo de pontos vermelhos/verdes indicando o surgimento de componentes de rádio frequência geradas pelas descargas, pode-se assim afirmar que há uma sensibilização do detector pelas componentes de RF geradas pelo ensaio, porém a solução de análise por espectrograma ficou muito sensível as regulagens e de difícil interpretação. Em função destes resultados, para a validação em laboratório alterações no método de análise foram necessárias, passando a se realizar análises no domínio do tempo baseando-se nas análises de Gadhave et al. (2014), onde apontou que a quantidade de picos das descargas parciais pode em alguns casos ser mais importante para a definição do estado de degradação de dielétricos do que simplesmente a amplitude máxima das descargas (GADHAVE; CHAUDHARI; BANDGAR, 2014).

Para a análise no domínio do tempo o sinal detectado é amostrado a uma frequência de 1 MHz, e coletadas em uma janela de amostragem de 25 ms e a análise sendo realizada a partir de um gráfico construído com os valores absolutos das amostras (I/Q) do sinal. Esta janela de amostragem de 25 ms foi escolhida por ser o equivalente a 1,5 do período da frequência industrial (60 Hz) brasileira, podendo também ser aplicado em sistemas de 50 Hz em que o período é 20 ms.

#### 5.4 COMPARAÇÃO ENTRE EQUIPAMENTOS

Para que se tivesse uma base de comparação de resultados utilizou-se o equipamento de RFI produzido pela *Radar Engineers* modelo *RFI Locator* durante as medidas realizadas em laboratório.

Entretanto o manual disponibilizado pelo fabricante oferece poucas informações técnicas sobre o equipamento, somente descrições básicas de como operá-lo. Informações como largura de banda, sensibilidade, ganho, base de tempo do *display*, são totalmente ausentes.

Portanto se fez necessário a realização de testes em laboratório para o levantamento das características do equipamento comercial a fim de se realizar uma comparação quantitativa entre os equipamentos comercial e desenvolvido. Com o auxílio do gerador de sinais de RF conectado a entrada do equipamento comercial foram realizados testes semelhantes aos anteriormente realizados para o levantamento da sensibilidade do equipamento e largura de banda da interface RDS, a ilustração do arranjo de ensaio pode ser observada na Figura 44.

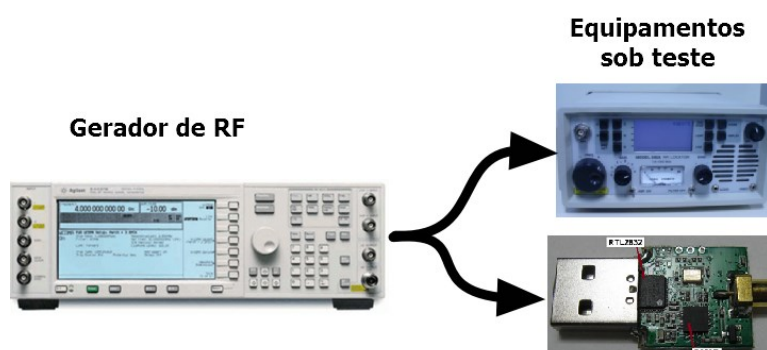


Figura 44. Ilustração do arranjo de ensaio de caracterização dos equipamentos

Fonte: O autor

Os dados foram aquiritados a partir de uma saída de sinal analógico conectada a um osciloscópio (marca Agilent modelo DSO-X 2002A). Esta saída analógica transmite o sinal acondicionado equivalente ao exibido pelo *display*.

Com o gerador de RF conectado na entrada do equipamento foram realizadas duas medidas com a finalidade de levantar a sensibilidade do equipamento. A primeira medida foi realizada com a saída do gerador desabilitada com o intuito de se medir o ruído de fundo (curva “a” da Figura 45). Em seguida a potência de saída do gerador foi variada até que se encontrasse o valor que se



sobressaísse ao ruído de fundo do equipamento, sendo neste momento realizada a segunda medida que é apresentada pela curva b) da Figura 45. Ambas as medidas foram realizadas com os equipamentos sintonizados na frequência de 40 MHz.

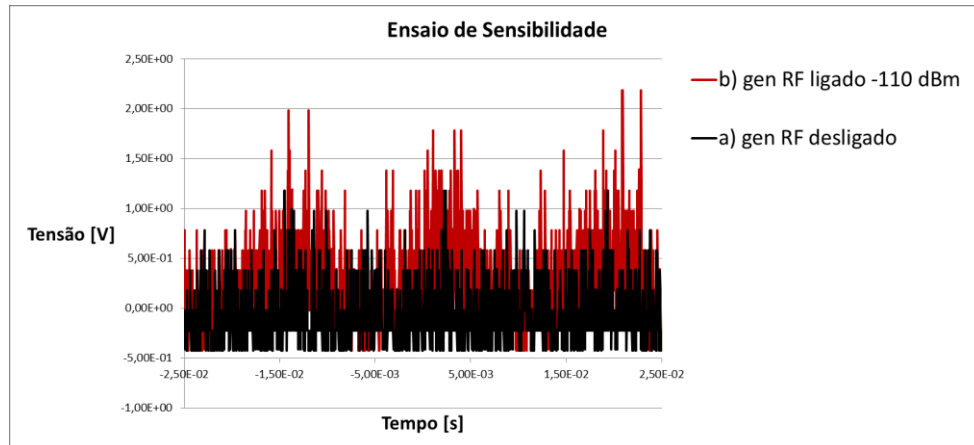


Figura 45. Teste de sensibilidade do equipamento comercial de RFI, curvas a) sem sinal na entrada do equipamento – ruído de fundo e b) sinal aplicado de -110 dBm em 40 MHz

Fonte: O autor

A mínima intensidade detectada pelo equipamento comercial foi de -110 dBm sendo 8 dB menos sensível que a interface RDS.

Para o levantamento da largura de banda do equipamento o gerador de RF realizou uma varredura em frequência de 39,7 MHz a 40,3 MHz aplicando um sinal de -56 dBm de intensidade, onde o resultado é apresentado na Figura 46.

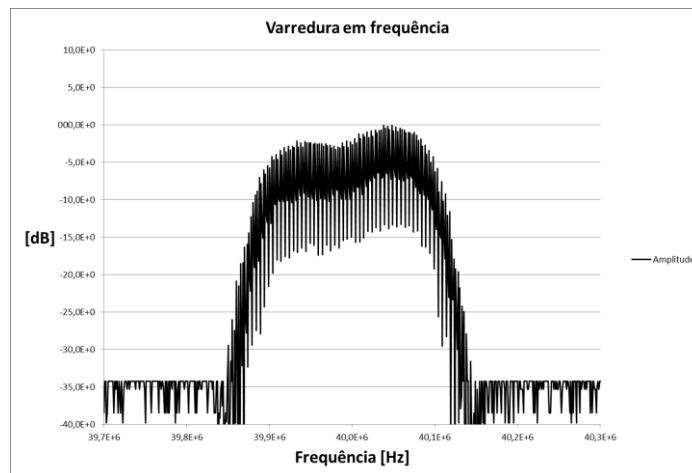


Figura 46. Resposta do equipamento comercial a um sinal de -56 dBm, realizando uma varredura entre as frequências de 39,7 MHz a 40,3 MHz.

Fonte: O autor

Analisando o gráfico da Figura 46 se observou que a largura de banda do equipamento é de 200 kHz sendo inferior aos 2,6 MHz da interface RDS.

O terceiro ponto analisado foi a escala de tempo do equipamento, para se determinar qual a unidade de tempo do *display*. Para isso foi variada a frequência do sinal modulante senoidal até que fosse possível observar um período completo no *display*, como apresentado pela Figura 47.

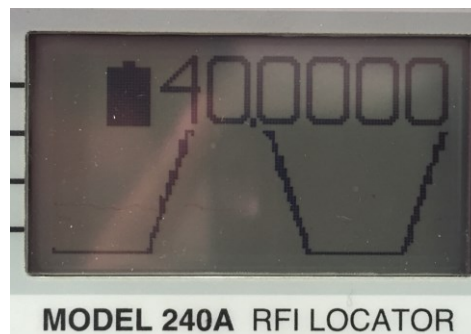


Figura 47. Imagem do display do equipamento comercial apresentando um período completo da senoide do sinal modulante de 131 Hz

Fonte: O autor

A partir da análise do gráfico da Figura 47 verificou-se o valor de 12 ms como sendo a janela de tempo que pode ser observada pelo *display*, o que é inferior aos 25 ms adotados pelo equipamento desenvolvido, vale resaltar que para o equipamento comercial a janela é fixa enquanto que no protótipo esta janela pode ser configurada.

A Tabela 5 apresenta a comparação entre os equipamentos.

Tabela 5. Comparação entre o equipamento comercial e o protótipo desenvolvido

Fonte: O autor

	Equipamento comercial	Protótipo
Sensibilidade	-110 dBm	-118 dBm
Largura de banda	200 kHz	2,6 MHz
Janela de tempo	12 ms	25 ms*
Resolução da tela	128x64	1920x1080 (480x320)*

\*Valor configurável

A partir dos testes de caracterização do equipamento comercial, foi possível constatar que para os três quesitos analisados, sensibilidade, largura de banda e



janela de amostragem o protótipo desenvolvido apresentou desempenho superior ao equipamento comercial.

### 5.5 VALIDAÇÃO EM LABORATÓRIO

Feita a comparação quantitativa das características dos equipamentos, comercial e protótipo, estes tiveram seu desempenho quanto a capacidade de detectar descargas parciais comparada em laboratório.

É apresentado na Figura 48 as imagens do protótipo montado em uma caixa metálica, incluindo o mini computador e a interface RDS acoplada a um conector BNC para a antena externa.



*Figura 48. Imagens do protótipo desenvolvido*

*Fonte: O autor*

Durante os testes em laboratório foi observado que o ruído proveniente da fonte chaveada de alimentação se sobrepunha ao sinal medido impossibilitando o uso do protótipo. Outra fonte possível de ruído encontrada no laboratório são os reatores utilizados em lâmpadas de descargas como lâmpadas de mercúrio e fluorescentes, sendo assim todas as lâmpadas do laboratório foram desligadas a fim de mitigar ruídos externos.

Frente ao problema detectado com a fonte de alimentação o sistema passou a ser alimentado por uma bateria de 10,4 Ah (tensão 5 V, corrente 2 A) como a apresentada na Figura 49. Esta alteração mitigou a interferência causada pelo ruído da fonte de alimentação.



*Figura 49. Bateria de alimentação*

*Fonte: O autor*

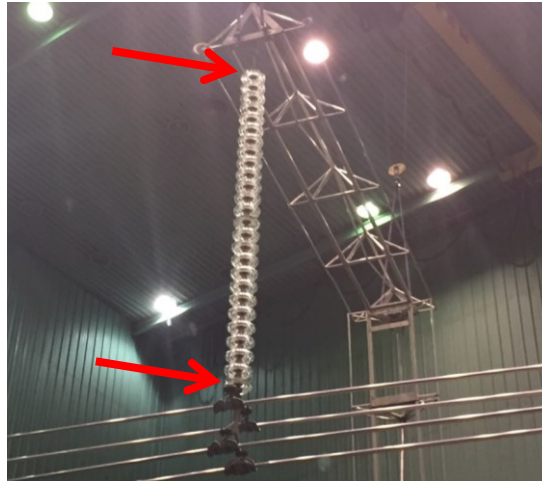
Para esta etapa de validação foi montado em laboratório um arranjo de ensaio que simula uma fase de uma torre de linha de transmissão de energia elétrica de 500 kV (fase-fase). Uma imagem geral do arranjo de ensaio é apresentada na Figura 50.



*Figura 50. Imagem do arranjo de ensaio simulando uma fase de uma torre de transmissão de 500 kV*

*Fonte: O autor*

No arranjo de ensaio uma cadeia com 26 isoladores de vidro do tipo disco são responsáveis tanto pela sustentação mecânica dos condutores energizados quanto pelo isolamento elétrico entre os cabos energizados e a torre aterrada. A cadeia de isoladores foi montada utilizando 24 isoladores novos e dois isoladores corroídos posicionados nas extremidades, como indicado pelas setas vermelhas na Figura 51.

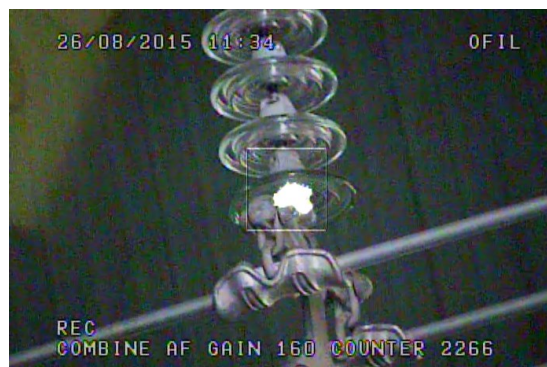


*Figura 51. Indicação com setas vermelhas os isoladores corroídos*

*Fonte: O autor*

O teste de tensão aplicada realizado consiste basicamente em submeter a cadeia de isoladores a tensão nominal (fase-terra) da linha de transmissão simulada, que para uma linha de 500 kV é aproximadamente 290 kV por um tempo mínimo de 30 minutos a fim de se detectar a presença de descargas parciais nos isoladores.

Para dirimir dúvidas quanto à existência ou não de descargas parciais no circuito, foram utilizadas as técnicas de inspeção por câmera ultravioleta e termovisão na detecção da presença de descargas parciais nos isoladores. A Figura 52 apresenta a medição realizada com a câmera ultravioleta indicando a existência de descargas do tipo corona na região próxima ao pino do isolador.



*Figura 52. Imagem da camera ultravioleta*

*Fonte: O autor*

Pode ser visto pela Figura 53 que através da técnica de inspeção por termovisão também se detectou alterações nos primeiros isoladores próximos ao

condutor energizado, comprovando a existência de descargas parciais durante os testes.



*Figura 53. Imagem da camera termográfica*

*Fonte: O autor*

Resumidamente a inspeção por RFI é realizada a partir de um operador portando um equipamento de medição de RFI que percorre a região a ser inspecionada, se aproximando dos equipamentos da rede elétrica e observando variações nos sinais captados.

Primeiramente realiza-se uma medição anterior ao início da inspeção, sendo esta feita em uma região próxima ao local a ser inspecionado, porém com baixa interferência de ruídos de descargas parciais. Esta medida é definida como ruído de fundo, a fim de se levantar as características do espectro de frequência do local.

Durante o deslocamento do operador pela região a ser inspecionada os sinais captados que diferem do ruído de fundo são classificados como provenientes de descargas parciais, sendo os equipamentos da rede elétrica próximos ao operador, como isoladores e transformadores, recomendados para inspeção detalhada ou substituição. O critério utilizado para análises destas inspeções é somente a existência ou não dos sinais de DP, sendo a intensidade do sinal utilizada somente para identificar a estrutura em que está localizada a fonte de RFI.

O equipamento comercial tem como finalidade atender este método de inspeção, assim o desenvolvimento do protótipo foi norteadado para que fosse possível atender as funcionalidades disponibilizadas pelo equipamento comercial.

Simultaneamente aos testes com o protótipo desenvolvido, medidas utilizando o equipamento comercial de RFI foram realizadas, ambos no domínio do tempo, sendo a janela de amostragem do equipamento comercial de 12 ms enquanto que para o protótipo desenvolvido esta janela é de 25 ms. Nas situações de sinal intermitente entre um semiciclo e outro da senoide, a janela maior possibilita a observação de uma quantidade maior de semicilos, aumentando a confiabilidade das medições.

É apresentado na Figura 54 o diagrama de blocos do funcionamento do protótipo no modo de análise no domínio do tempo.

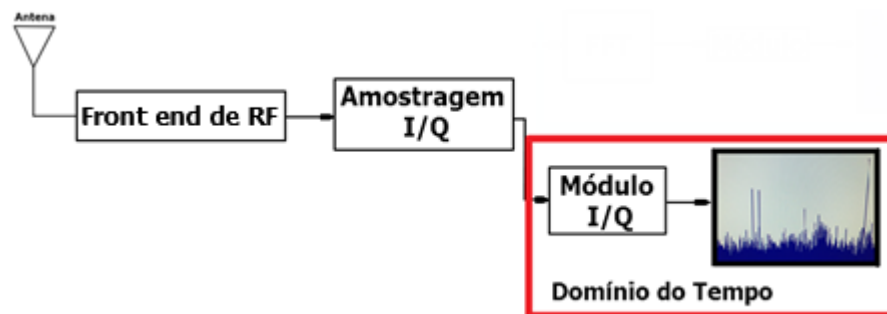


Figura 54. Diagrama de blocos da análise no domínio do tempo

Fonte: O autor

A comparação entre os resultados é apresentada na Figura 55 e Figura 56, sendo apresentado do lado esquerdo as medidas realizadas com o equipamento comercial e à direita as medidas realizadas com o protótipo, ambos os dispositivos estavam sintonizados na frequência de 40 MHz.

Seguindo o procedimento de inspeção, a medição consistiu primeiramente na detecção do ruído de fundo do ambiente com o arranjo de ensaio desligado, para que fosse possível ter-se uma medida de referência e comparativa com as realizadas subsequentemente. Pode-se observar na Figura 55 a apresentação dos sinais de ruído de fundo obtidos pelos equipamentos, comercial e protótipo, onde não foram detectados sinais de ruídos oriundos de fontes externas.

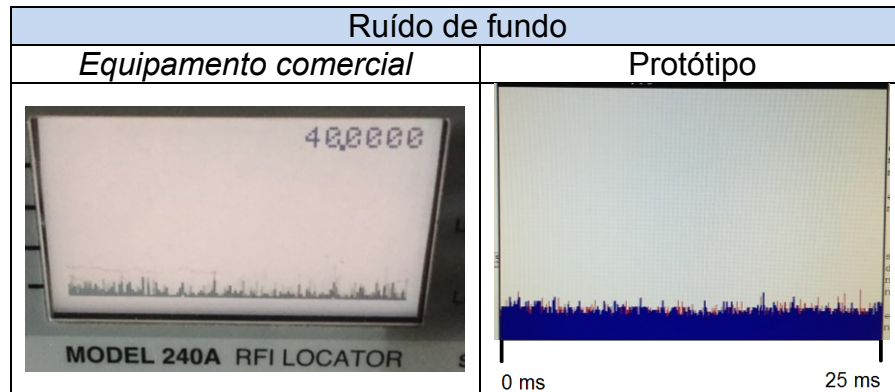


Figura 55. Comparação do ruído de fundo obtido com o equipamento comercial e o protótipo desenvolvido sintonizados em 40 MHz

Fonte: O autor

Tendo-se mantido os equipamentos com as mesmas configurações usadas para a obtenção do ruído de fundo, submeteu-se a cadeia de isoladores à tensão de 290 kV, sendo observado nos equipamentos as alterações dos sinais captados pela antena. Estes sinais são apresentados na Figura 56, sendo as imagens da esquerda referentes as medidas realizadas com equipamento comercial e as da direita os sinais obtidos através do protótipo desenvolvido.

A operação do equipamento de RFI comercial, utilizado como referência, em inspeções possibilita a realização de análises somente quanto a detecção ou não de sinais interferentes, sendo estes confrontados com o ruído de fundo a fim de se identificar a presença ou não de DPs em regiões próximas ao operador, a fim de se identificar os equipamentos da rede elétrica que possuam defeitos.

Ao se comparar os resultados das imagens foi possível verificar que o protótipo desenvolvido detectou os sinais de descargas parciais, assim como o equipamento comercial, o que pode ser visto na Figura 56. Percebe-se também que as medidas com o equipamento comercial apresentam dois grupos de picos de DPs, enquanto que o protótipo apresenta 3 grupos de picos. Isto se deve às diferentes janelas de tempo utilizadas na medida: 12 ms no equipamento comercial (captando 2 picos da rede de 60 Hz) e 25 ms no protótipo (captando 3 picos de 60 Hz). Esta característica se justifica pelo fato de que as descargas parciais do tipo corona ocorrem prioritariamente nos picos de tensão da rede elétrica (referência).

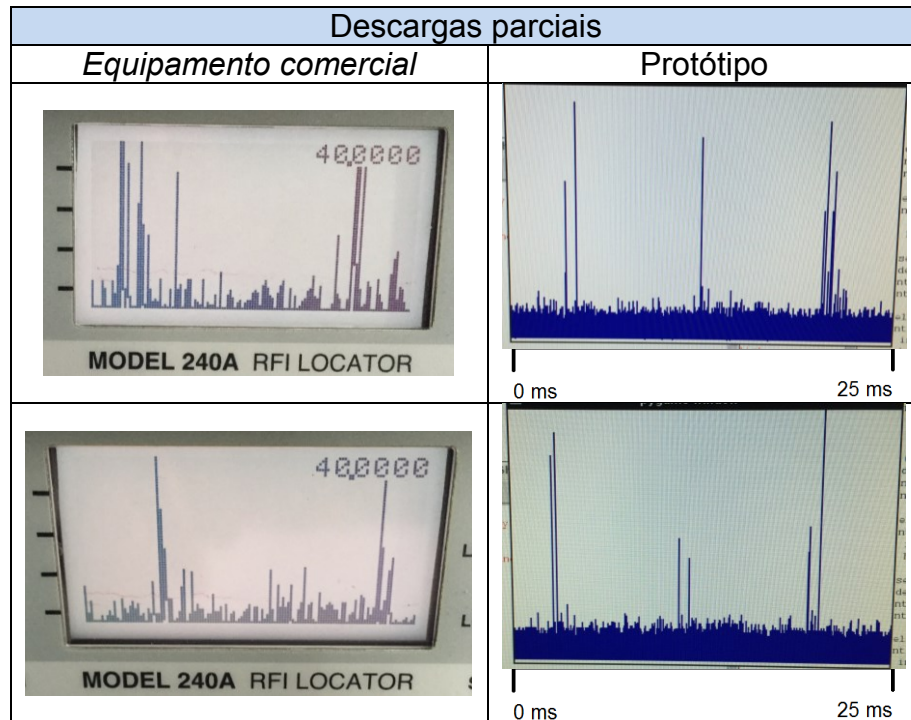


Figura 56. Comparação dos sinais de descargas parciais medidos com o equipamento comercial e o protótipo sintonizados em 40 MHz

Fonte: O autor

Outra faixa de frequência investigada com o protótipo foi a de 30 MHz, a qual além de ser uma região de detecção de descargas parciais também se faz interessante à investigação com o protótipo por ser uma frequência próxima ao limite inferior de operação da interface RDS.

É possível visualizar a comparação entre o ruído de fundo obtido com o equipamento comercial (imagem da esquerda) com o ruído de fundo (imagem da direita) obtido através do protótipo desenvolvido na Figura 57.



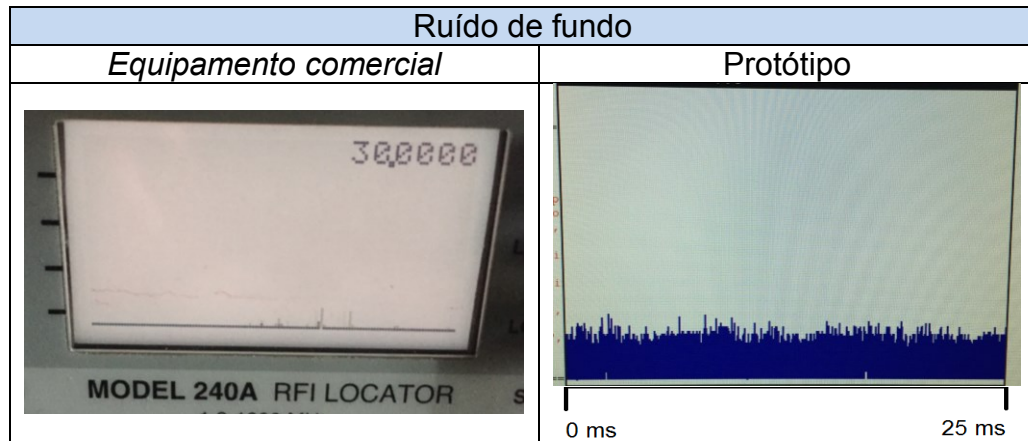


Figura 57. Comparação do ruído de fundo obtido com o equipamento comercial e o protótipo desenvolvidos sintonizados em 30 MHz

Fonte: O autor

Os sinais de DPs detectados por ambos equipamentos são apresentados na Figura 58. Assim como em 40 MHz em 30 MHz o protótipo desenvolvido detectou a presença de descargas parciais quando comparado com o ruído de fundo da Figura 57. O mesmo pode ser observado com o equipamento comercial.

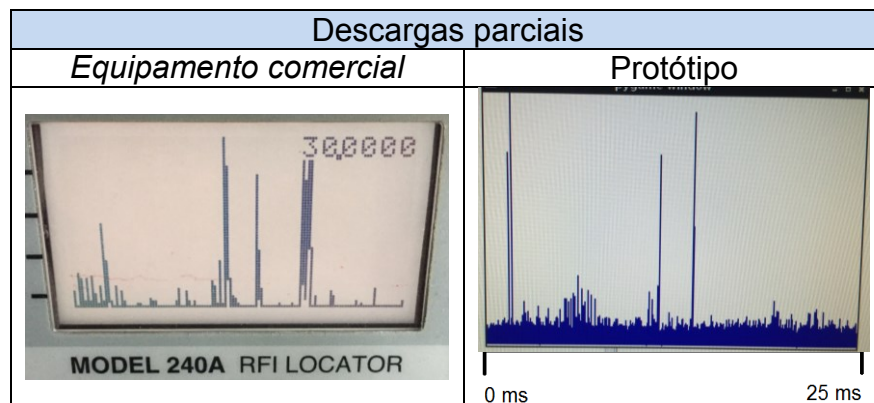


Figura 58. Comparação dos sinais de descargas parciais medidos com o equipamento comercial e o protótipo sintonizados em 30 MHz

Fonte: O autor

Na sequência mais um teste para validação quanto a capacidade de detecção de DPs do protótipo foi realizado. No ensaio se utilizou um isolador polimérico com defeitos forçados. Foi simulado o efeito de descargas parciais internas com o descolamento do material polimérico do núcleo de fibra de vidro. Estas fendas foram preenchidas com uma solução salina afim de aumentar a



ocorrência de descargas parciais internas ao material. O isolador polimérico pode observado na Figura 59.



*Figura 59. Isolador polimérico para redes de distribuição de 34,5 kV*

*Fonte: O autor*

A Figura 60 mostra em detalhe os defeitos forçados no material polimérico, também é possível observar sobre o material algumas gotas da solução salina que foi injetada no isolador.



*Figura 60. Detalhe dos danos causados ao isolador polimérico*

*Fonte: O autor*

Antes de energizar o isolador foram realizadas medidas do ruído de fundo com ambos os equipamentos sintonizados nas frequências de 30 MHz e 40 MHz, estes resultados são apresentados na Figura 61. Durante as medições subsequentes não foram alteradas outras variáveis que não a frequência sintonizada dos equipamentos.

No dia em que foram conduzidos os testes com o isolador polimérico se constatou a presença de um ruído constante na frequência do 30 MHz, o qual não teve sua fonte localizada, sendo externa ao laboratório.

A presença de ruídos indesejados nas faixas de frequência de interesse justifica a necessidade de inspecionar os elementos da rede elétrica em diferentes faixas, a fim de mitigar problemas de detecção devido a ruídos externos.



*Figura 61. Comparação do ruído de fundo medidos com o equipamento comercial e o protótipo sintonizados em 30 MHz e 40 MHz*

*Fonte: O autor*

Para realização dos testes foi utilizado o arranjo de ensaio apresentado na Figura 62. O isolador ficou submetido a tensão de 30 kV sendo tomadas medidas com ambos equipamentos.



*Figura 62. Arranjo de ensaio com o isolador polimérico*

*Fonte: O autor*

Os resultados obtidos após a energização do arranjo de ensaio são apresentados na Figura 63.

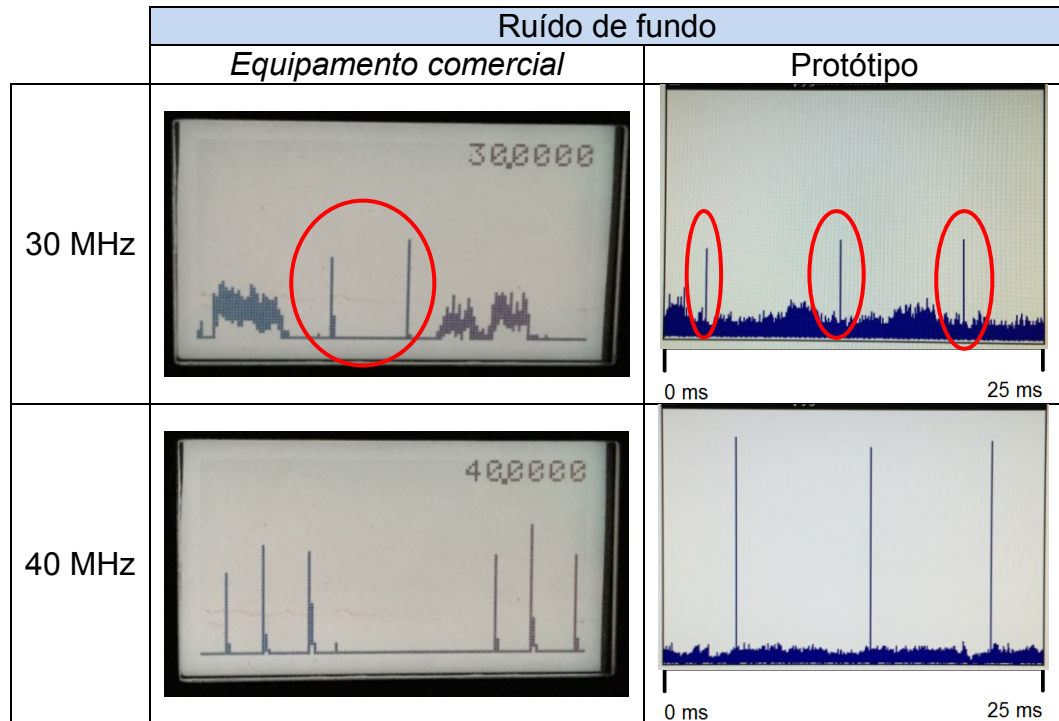


Figura 63. Comparação dos sinais de descargas parciais medidos com o equipamento comercial e o protótipo sintonizados em 30 MHz e 40 MHz

Fonte: O autor

Comparando os sinais obtidos durante a realização do ensaio com o ruído de fundo, pode-se observar o surgimento de picos consequentes da presença de descargas parciais em ambos os equipamentos. Verifica-se que o ruído constante observado na medição de fundo da frequência de 30 MHz não interferiu na identificação dos picos das descargas parciais marcadas com círculos vermelhos. Vale ressaltar que parte do procedimento de inspeção em campo é identificar o ruído interferente das fontes de descargas parciais em dielétricos que se sobressaem ao ruído de fundo medido anteriormente (DOBLE, 2012; GADHAVE; CHAUDHARI; BANDGAR, 2014; NESBITT et al., 2010).

Com o protótipo sintonizado em 30 MHz os sinais detectados de DPs apresentaram maior destaque em relação ao nível de ruído, quando comparado com o resultado obtido pelo equipamento comercial. Esta característica contribuiu para o desenvolvimento em trabalhos futuros de um método de interpretação automática dos sinais detectados. Esta maior clareza na detecção dos picos no protótipo em

relação ao equipamento comercial é provavelmente devida à sua maior banda passante (2,6 MHz contra 200 kHz)

Após a comparação entre o protótipo desenvolvido e o equipamento comercial, foram realizados testes, ainda com o isolador polimérico, com a finalidade de comparar os sinais medidos com o protótipo e a medição padrão de descargas parciais realizadas no laboratório com o equipamento da Marca Biddle – *Partial Discharge Detector Series 27000* (Figura 64). A medição padrão de descargas parciais mede as componentes do ruído conduzido pela fonte de alta tensão na faixa de 1 MHz.

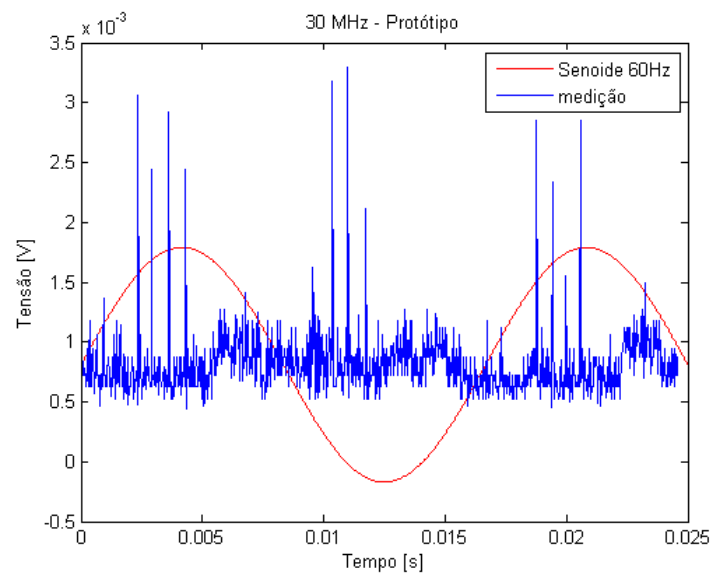


*Figura 64. Equipamento de medição padrão de descargas parciais da Marca Biddle – Partial Discharge Detector Series 27000*

*Fonte: O autor*

Para melhor comparação entre estes resultados, as medidas com o protótipo foram realizadas de maneira sincronizada com a rede, sendo a aquisição dos dados iniciada simultaneamente com o semiciclo positivo da senoide de 60 Hz, da fase à qual o gerador de alta tensão estava conectado. Para este sincronismo foi desenvolvido um circuito que aciona uma interrupção do Raspberry Pi a cada passagem pelo zero da rede no fim do semiciclo negativo.

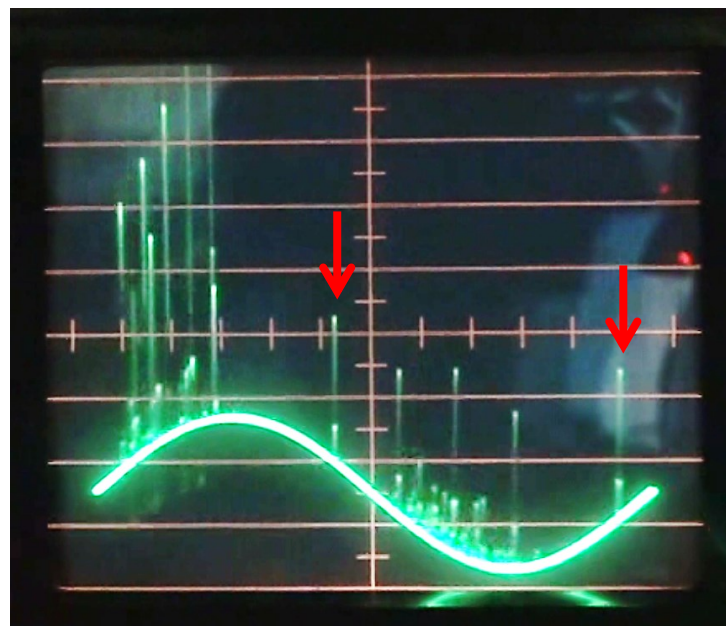
A Figura 65 apresenta a medição realizada com o protótipo sintonizado em 30 MHz (curva azul) sobreposto a senoide de 60 Hz para demonstrar o sincronismo da medição.



*Figura 65. Medição das descargas parciais com o protótipo em 30 MHz (Curva azul), representação do sinconismo com a senoide de 60 Hz.*

*Fonte: O autor*

A medição com o equipamento padrão de descargas parciais, referente a medição realizada com o protótipo apresentada na Figura 65, pode ser visualizada na Figura 66. Para melhor interpretação dos sinais as setas vermelhas indicam os pulsos de referência utilizados para estimar o valor das descargas parciais.

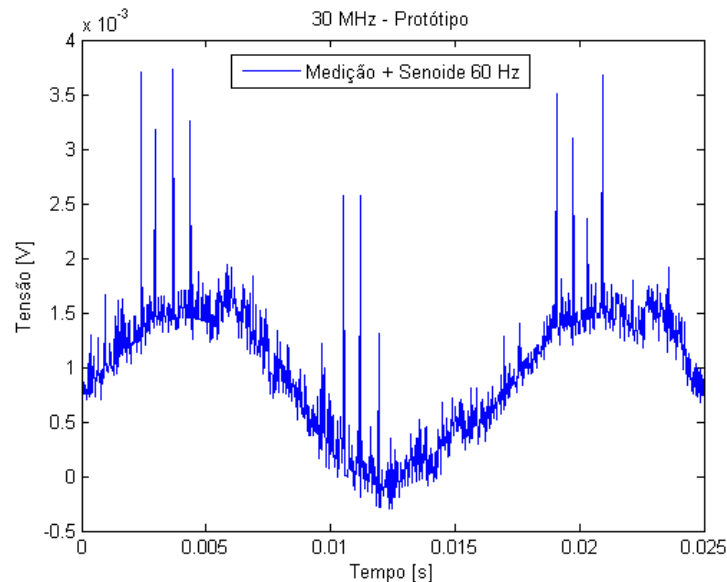


*Figura 66. Medição padrão de descargas parciais. Pulsos de referência indicados com setas vermelhas*

*Fonte: O autor*



Para comparação dos resultados o sinal medido com o equipamento desenvolvido foi somado a um sinal senoidal (Figura 67) melhorando a comparação entre os sinais obtidos com o protótipo e o medidor padrão.



*Figura 67. Medição realizada com o protótipo sobreposta ao sinal senoidal de 60 Hz*

*Fonte: O autor*

Ao se comparar a Figura 67 com a Figura 66, observa-se que com o medidor padrão é possível observar 5 picos bem definidos no semiciclo positivo e três picos no semiciclo negativo, enquanto que o protótipo sintonizado em 30 MHz detectou quatro picos de descargas parciais nos semiciclos positivos e três no semiciclo negativo. Com estes resultados pode-se concluir que o protótipo está detectando as descargas parciais provenientes do isolador em análise, e não sinais de outras fontes de descargas.

Devido a característica de aleatoriedade das descargas parciais os sinais detectados sofrem alterações dependendo do instante de tempo em que foram realizadas as medidas. A Figura 68 a) apresenta o sinal obtido a partir do medidor padrão e a Figura 68 b) apresenta a medição realizada com o protótipo sintonizado em 40 MHz, medição somada a um sinal senoidal de 60 Hz.

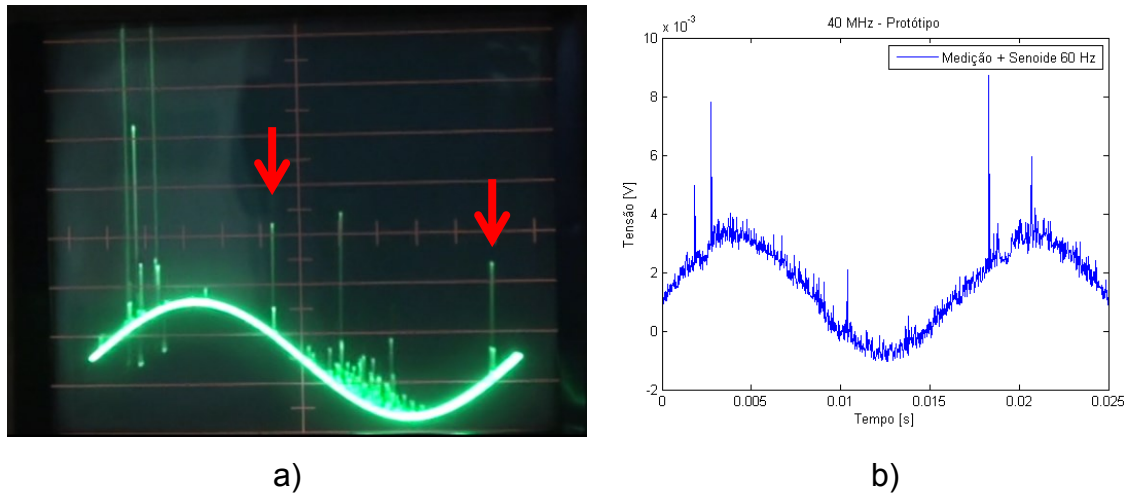


Figura 68. a) Medição de descargas parciais padrão, b) medição realizada com o protótipo desenvolvido somado ao sinal senoidal de 60 Hz. As setas vermelhas indicam os pulsos de referências

Fonte: O autor

Ao se comparar os gráficos da Figura 68, enquanto que com medidor padrão se pode identificar três pulsos de maior intensidade no semiciclo positivo e um no semiciclo negativo, na medição com o protótipo foi possível detectar dois pulsos no semiciclo positivo e um no semiciclo negativo. Vale salientar que não é possível a realização das medidas simultaneamente com os dois equipamentos, sempre havendo uma diferença entre o instante de medição de um equipamento e outro, justificando estas pequenas diferenças.

Os resultados obtidos a partir da comparação do equipamento comercial com o medidor padrão de descargas parciais, possibilita verificar a existência de correlação e de desempenho entre os dois equipamentos, sendo que o protótipo conseguiu reproduzir os resultados obtidos com o medidor padrão de descargas parciais.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou as etapas do desenvolvimento de um sistema de detecção de RFI de baixo custo baseado em um RDS, voltado para a detecção de descargas parciais em isoladores elétricos. O sistema consiste na integração de uma interface RDS com um computador Raspberry Pi, juntamente com um software para comunicação entre os módulos e análise gráfica dos resultados.

O sistema desenvolvido é portátil (dimensões e peso semelhantes a um *smartphone*) e é alimentado por uma bateria, proporcionando autonomia da ordem de 4 horas, sendo suficiente para efetuar vários testes em campo.

Os resultados alcançados quanto a detecção dos sinais de descargas parciais com o protótipo se aproximaram dos obtidos com o emprego de um equipamento comercial, mostrando a viabilidade do desenvolvimento de uma solução de baixo custo para inspeção de equipamentos elétricos por componentes de rádio frequência. Além disso, nas análises efetuadas, percebe-se uma maior clareza na visualização dos picos de descargas parciais detectados pelo protótipo em relação ao equipamento comercial. Isto facilitaria a implementação futura de algoritmos automáticos de detecção de picos indicando a presença de descargas parciais.

O protótipo apresentou desempenho superior quanto a sensibilidade do dispositivo, largura de banda e janela de amostragem quando comparado com o equipamento de RFI comercial de referência.

A comparação do protótipo e um medidor padrão de descargas parciais possibilitou a verificação do desempenho do equipamento, comprovando a capacidade de detecção de componentes de RF de descargas parciais e resultado obtido correlacionado entre os equipamentos.

Para ser utilizado como produto, o dispositivo desenvolvido demandaria aperfeiçoamento do *hardware* e *software*, a fim de melhorar seu desempenho quanto ao processamento dos dados, que pode trazer um ganho de desempenho de processamento reduzindo o atraso entre as medidas.

Estima-se que ao final do desenvolvimento como produto seja possível a obtenção de um equipamento com custo aproximado de US\$200,00, bem inferior aos US\$ 15.000,00 a US\$ 60.000,00 dos equipamentos comerciais disponíveis.

Ao desenvolver um equipamento portátil de baixo custo, pretende-se que o mesmo possa ser utilizado por um maior número de equipes de manutenção das



concessionárias de energia. Desta forma pode-se detectar previamente isoladores com defeito antes da ocorrência de falhas, garantindo maior confiabilidade do sistema, desempenho e continuidade de serviço.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Aos trabalhos futuros recomenda-se o aperfeiçoamento do protótipo visando o desenvolvimento de um produto, integrando ao sistema uma tela *touch*, o que possibilitará a operação do dispositivo sem a necessidade de conexão de monitor, teclado e mouse. Assim como a inclusão de uma bateria interna.

Aperfeiçoamento do método de análises do dispositivo, a partir do levantamento de um banco de dados de sinais de descargas parciais a fim de se realizar um trabalho de classificação dos problemas conforme os sinais detectados.

Realização de testes com a utilização de uma antena direcional e melhor adaptada à faixa de frequências utilizadas, o que poderia aumentar a sensibilidade de detecção.

Desenvolvimento de sensores específicos para aplicação do dispositivo na análise e inspeção de subestações e sistemas isolados a gás (*GIS – Gas Insulated Switchgear*).

## REFERÊNCIAS

- ACEVEDO, J. E. Field Experiences Using Radio Frequency Scanning (RFS) to Detect Partial Discharge (PD) in Bus Duct and Metal Clad Switchgear of Electrical Generating and Transmission Substations. **IEEE 10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials**, n. 978-1-4673-2851-7/12, p. 10–13, 2012.
- AGILENT TECHNOLOGIES. Osciloscópios Agilent InfiniiVision 2000 série-X. **Guia do Usuário**, n. 75015-97053, p. 1–370, 2012.
- AIRSPY. SDR#. **Software**, v. 1423, 2015.
- ALESSI, L. P.; OGAWA, S. K. **Estudo comparativo entre as técnicas aplicadas à inspeção instrumentalizada de redes de distribuição de energia elétrica**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2010.
- AMBRÓZIO, D. R.; NOVOLAR, I.; MARTIN, C. Análise das técnicas de ultra-som e rádiointerferência para verificação da ocorrência de descargas parciais em isoladores. **Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Trabalho de Conclusão de Curso**, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity ( Dielectric Constant ) of Solid Electrical Insulation. **Standard**, n. C, p. 1–20, 2012.
- ANEEL. **Indicadores de Continuidade**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=79>>. Acesso em: 10 ago. 2015a.
- ANEEL. **Divulgação dos limites dos indicadores DIC, FIC, DMIC e DICRI**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/srd/indqual/default.cfm>>. Acesso em: 10 ago. 2015b.
- ARORA, K.; VARSHNEY, N.; AGRAWAL, A. Wavelet Analysis Used for Partial Discharge Pattern Recognition. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 4, n. 1, p. 125–130, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6940 - Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão Medição de Descargas Parciais. **ABNT/CB-003 Eletricidade**, n. ABNT/MB 575, p. 1–36, 1981.
- ATWELL, C. The biggest-little revolution : 10 single-board computers for under \$ 100. **EDN Network**, p. 1–10, 2013.
- BARD, J. et al. **Software Defined Radio: The Software Communications Architecture**. 1. ed. England: Wiley, 2003.
- BARTNIKAS, R. Partial Discharges Their Mechanism, Detection and Measurement. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 9, n. 5, p. 763–808, 2002.
- BARTNIKAS, R.; MCMAHON, E. J. **Engineering Dielectrics: Corona Measurement and Interpretation**. Philadelphia, United States: ASTM - American Society for Testing and Materials, 1979. v. 1
- BORGES, V. S. **ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE DETECTOR DE ISOLADORES COM FALHAS**. Curitiba, Brasil: Universidade Federal do Paraná: Trabalho de Conclusão de Curso, 2011.

CAVALLINI, A. et al. Advanced PD Inference in On-Field Measurements . Part I: Noise Rejection. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 10, n. 2, 2002.

CAVALLINI, A. et al. Advanced PD Inference in On-Field Measurements . Part 2: Identification of Defects in Solid Insulation Systems. **Cavllini et al: Advanced PD Inference in On-Field Measurements. Part 2: Identification of Defects**, v. 10, n. 3, p. 528–538, 2003.

COMPAQ et al. Universal Serial Bus. **Specification**, n. 2.0, p. 1–650, 2000.

CONTIN, A.; PASTORE, S. Classification and Separation of Partial Discharge Signals by Means of their Auto-correlation Function Evaluation. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 16, n. 6, p. 1609–1622, 2009.

COSTA, A. A. **Aperfeiçoamento do Método FETD para simulação de Descargas Elétricas Não-Lineares**. Curitiba, Brasil: Universidade Federal do Paraná - UFPR: Dissertação de Mestrado, 2007.

CUENCA, W. H. **Aplicação de Sistemas Inteligentes no Reconhecimento de Padrões de DPs em Transformadores de Potência**. Rio de Janeiro, Brasil: ade Federal do Rio de Janeiro UFRJ: Dissertação de Mestrado, 1998.

CUENCA, W. M. H. **Caracterização Dos Sinais De Descargas Parciais Em Equipamentos De Alta Tensão A Partir De Modelos Experimentais**. Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro: Tese de Doutorado, 2005.

CURTIS INDUSTRIES. Understanding Terminology. **RFI Power Line Filters**, p. 84–85, 2015.

DOBLE. Handheld partial discharge (PD) detection without the need for costly outages. **PD surveyor - PDS 100**, p. 1–4, 2012.

ELEMENT14. **Meet the Raspberry Pi B+**. Disponível em: <<http://www.element14.com/community/community/raspberry-pi/raspberry-pi-bplus/blog/2014/07/14/meet-the-raspberry-pi-b>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

FAGUNDES, R. C. **Avaliação de Acessórios Poliméricos de Redes Compactas protegidas por meio de Ensaio de Multiestressamento e Simulação Computacional**. Curitiba, Brasil: Universidade Federal do Paraná: Dissertação de Mestrado, 2008.

FAIER, J. **Curvas Principais Aplicadas na Identificação de Descargas Parciais em Equipamentos de Potência**. Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ: Dissertação de Mestrado, 2006.

GADHAVE, V.; CHAUDHARI, H.; BANDGAR, R. Partial Discharge Detection using PDS 100. **International Journal of Engineering Developmet and Research**, v. 2, n. 3, p. 2914–2917, 2014.

GORCHINSKI, A. L. et al. **Termografia em redes de distribuição de energia elétrica**III Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção - Conbrepro. **Anais...**Ponta Grossa - PR: 2013

HOZUMI, N.; OKAMOTO, T.; IMAJO, T. Discrimination of Partial Discharge Patterns Using a Neural Network. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v. 27, n. 3, 1992.

IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 270 -High-voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements. **Standard**, 1981.

IEEE P1900.1. **SDRF Cognitive Radio Definitions**SDR Forum. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-06-R-0011-V1\\_0\\_0.pdf](http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-06-R-0011-V1_0_0.pdf)>.

INTEL. **Packet Processing on Intel® Architecture**. Disponível em: <<http://www.intel.com/content/www/us/en/intelligent-systems/intel-technology/packet-processing-is-enhanced-with-software-from-intel-dpdk.html>>. Acesso em: 2 nov. 2015.

KANE, C. et al. Advantages of Continuous Monitoring of Partial Discharges in Rotating Equipment and Switchgear. **IEEE IAS Pulp and Paper Industry Conference**, p. 117–122, 2003.

KANNUS, K.; LEHTIO, A.; LAKERVI, E. Radio and tv interference caused by public 24 kV distribution networks. **IEEE Transacion on Power Delivery**, v. 6, n. 4, p. 1856–1861, 1991.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES. **E4432B ESG-D Series Digital RF Signal Generator, 3 GHz**. Disponível em: <<http://www.keysight.com/en/pd-1000002817:epsg:pro-pn-E4432B/esg-d-series-digital-rf-signal-generator-3-ghz?&cc=BR&lc=por>>. Acesso em: 7 nov. 2015.

KOWALSKI, E. L. et al. **Sistema de inspeção instrumental para detecção de falhas em isoladores nas linhas de distribuição**Curitiba, BrasilP&D ANEEL Projeto 2866-032, , 2006.

KREUGER, F.H., GULSKI, E. E KRIVDA, A. Classification of partial discharges. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v. 28, p. 917–931, 1993.

LEMKE, E. et al. Guide for Electrical Partial Discharge Measurements on Compliance to IEC 60270. **Electra**, n. 241, p. 61–67, 2008.

LIMA, A. G. M. RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE: O PRÓXIMO SALTO NO MUNDO DAS TELECOMUNICAÇÕES E COMPUTAÇÃO. **Revista Digital - Comunicação digital e tópicos relacionados**, p. 1–5, 2004.

MARTINS, R. M. Rádio Definido por Software - SDR. **Grupo de Pesquisa em Rádio Definido por Software**, p. 1–43, 2015.

MOORE, P. J. P. J.; PORTUGUES, I. E. I. E.; GLOVER, I. A. I. A. Radiometric Location of Partial Discharge Sources on Energized High-Voltage Plant. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 3, p. 2264–2272, jul. 2005.

MUHR, M.; SCHWARZ, R. **Partial discharge measurement as a Diagnostic Tool for HV-Equipments**2006 IEEE 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials. **Anais...IEEE**, jun. 2006Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4062640>>

MUNARO, M.; AL., E. Fatores de influência na compatibilidade de cabos protegidos, isoladores e acessórios utilizados em redes aéreas compactas de distribuição de energia elétrica, sob condição de multi-estressamento. **CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA**, p. 555–560, 2003.

NESBITT, A. et al. HV Substation Surveillance Using RFI: Isolator Fault Detection

and Characterisation. **77th International Doble Client Conference**, p. 1–17, 2010.

PABUNA, E. **Substation Surveillance Using Radio Frequency Interference ( RFI ) Measurments**39th Annual National Convention Technical Presentation. **Anais...**Filipinas: Institute of Integrated Electrical Engineers of the Philippines, 2014

PALITÓ, T. T. C. **Detecção acústica de descargas parciais com transdutor piezoelétrico**. São Carlos, Brasil: Universidade de São Paulo, 2015.

PAOLETTI, G.; GOLUBEV, A. **Partial discharge theory and applications to electrical systems**Conference Record of 1999 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No.99CH36338). **Anais...**Seattle, United States: IEEE, 1999Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=779355>>

PORTELLA, K. F.; ET AL. Efeitos da poluição atmosférica (litorânea e industrial) em isoladores da rede elétrica da região metropolitana de Salvador. **Química Nova**, v. 31, p. 340–348, 2008.

PORTUGUÉS, I. E. et al. RF-Based Partial Discharge Early Warning System for Air-Insulated Substations. **IEEE Transaction on Power Delivery on Power Delivery**, v. 24, n. 1, p. 20–29, 2009.

POWER DIAGNOSTIX. **RIV Meter**. Disponível em: <<https://www.pdix.com/products/riv-measurement/rivmeter.html>>. Acesso em: 23 out. 2015.

RAFAEL MICRO. R820T High performance low power Advanced Digital TV Silicon Tuner Datasheet. **Especificação técnica**, n. 195, p. 1–26, 2011.

ROBLES, G.; FRESNO, J. M.; MARTÍNEZ-TARIFA, J. M. Separation of Radio-Frequency Sources and Localization of Partial Discharges in Noisy Environments. **Open Access: Sensors**, p. 9882–9898, 2015.

RTL-SDR. **About RTL-SDR**. Disponível em: <<http://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr/>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

SALAMA, M. M. A.; BARTNIKAS, R. Determination of Neural-Network Topology for Partial Discharge Pulse Pattern Recognition. **IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL NETWORKS**, v. 13, n. 2, p. 446–456, 2002.

SALAMANA, M. M. A.; BARTNIKAS, R. Fuzzy Logic Applied to PD Pattern Classification. **IEEE Transactions on Dielecfrics atid Electrical Insulation**, v. 7, n. 1, p. 118–123, 2000.

SATISH, L.; ZAENGL, W. S. Can Fractal Features be Used for Recognizing 3-d Partial Discharge Patterns? **IEEE Bansactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 2, n. 3, p. 352–359, 1995.

SHIHAB, S.; WONG, K. L. **Detection of faulty components on power lines using radio frequency signatures and signal processing techniques**2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077). **Anais...**IEEE, 2000Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=847193>>

SILVA, W. S. et al. Introdução a Rádios Definidos por Software com aplicações em GNU Radio. In: **Minicursos do XXXIII Simpósio Brasileiro de Redes de**

**Computadores e Sistemas Distribuídos — SBRC 2015.** 1. ed. Vitória: SBRC - Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2015. p. 216–265.

SOUZA NETO, J. M. R. DE et al. Partial Discharge Location using Unsynchronized Radiometer Network for Condition Monitoring in HV Substations - A Proposed Approach. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 364, p. 012053, 28 maio 2012.

SPELLMAN HIGH VOLTAGE ELECTRONICS CORPORATION. **Spellman High Voltage Electronics Corporation.** Disponível em: <<http://www.spellmanhv.com/en/Technical-Resources/Faqs/Technology-Terminology/What-is-corona.aspx>>. Acesso em: 22 out. 2015.

SUPERKUH. **RTL-SDR and GNU Radio with Realtek RTL2832U [Elonics E4000/Raphael Micro R820T] software defined radio receivers.** Disponível em: <<http://www.superkuh.com/rtlsdr.html>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

SWINKA FILHO, V. **Imagens de defeitos por descarga parcial estimulada por raio x pulsado em materiais dielétricos poliméricos.** Curitiba, Brasil: Universidade Federal do Paraná: Tese de Doutorado, 2000.

TEKTRONIX. **Oscilloscopes.** Disponível em: <<http://www.tek.com/oscilloscope>>. Acesso em: 7 nov. 2015.

THE PARTIAL DISCHARGE ACADEMY. **What is PD? Partial Discharge.** Disponível em: <<http://www.partial-discharge-academy.com/what-is-partial-discharge>>. Acesso em: 28 abr. 2015.

THOMSEN, V. B. E. The Physics Teacher. **Journal of Chemical Education**, v. 74, n. 8, p. 897, ago. 1997.

WARREN, V.; STONE, G. C.; FENGER, M. ADVANCEMENTS IN PARTIAL DISCHARGE ANALYSIS TO DIAGNOSE STATOR WINDING PROBLEMS. **IEEE International Symposium on Electrical Insulation**, n. 0-7803-5931-3, p. 497–500, 2000.

WENZEL, D.; BORSI, H.; GOCKENBACH, E. Partial Discharge Recognition and Localization on Transformers via Fuzzy Logic. **Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation**, p. 1–4, 1994.

WIRELESS INNOVATION. **Wirelessinnovation.** Disponível em: <<http://www.wirelessinnovation.org/assets/documents/SoftwareDefinedRadio.pdf>>.

## Apêndice A – Artigos Publicados

XXXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES – SBFT2015, 1-4 DE SETEMBRO DE 2015, JUIZ DE FORA, MG

# Utilização de um SDR para análise de emissões eletromagnéticas oriundas de descargas elétricas parciais

Victor Salvino Borges, Edemir L. Kowalski, Márlcio Bonfim, Luiz Felipe R. B. Toledo, Guilherme Cunha da Silva e Ricardo da Cunha Bezerra

**Resumo**— Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema de detecção de Radio Interferência de baixo custo baseado em um SDR (*Software Defined Radio*) para detecção e análise de componentes de rádio frequência originadas por descargas parciais em isoladores elétricos usados nas redes de distribuição de energia. Esta técnica é utilizada com a finalidade de avaliar em campo o estado de degradação de isoladores elétricos, antes da ocorrência da falha, garantindo a confiabilidade e manutenção do fornecimento de energia.

**Palavras-Chave**—SDR, descargas parciais, inspeção de isoladores, redes elétricas.

**Abstract**—This paper presents the development of a low cost Radio Interference detection system based on a SDR (*Software Defined Radio*) for detection and analysis of radio frequency components caused by partial discharges in electrical insulators used in power distribution networks. This technique is used in order to evaluate the degradation state of electrical insulators before the failure, ensuring the reliability and maintenance of the electric power distribution system.

**Keywords**— SDR, partial discharges, insulator inspection, power lines.

## I. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico tem seu desempenho intimamente ligado à integridade e confiabilidade dos componentes isolantes, sejam isoladores (vidro, cerâmica, poliméricos), vernizes, gases como o SF<sub>6</sub>, os quais estão presentes em isoladores, transformadores, barramentos, disjuntores entre outros. A degradação e a falha destes componentes podem representar desligamentos não programados do fornecimento de energia elétrica, podendo deixar bairros, cidades ou até mesmo grandes regiões sem energia, o que também impacta diretamente nos índices de continuidade determinados pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (DEC, FEC, DIC, FIC, DMIC) [1], [2].

Considerando este cenário, a manutenção preditiva ganha destaque, pois a confiabilidade e a necessidade de se prever possíveis falhas no sistema de isolamento das redes antes de sua ocorrência, passam a ser prioritárias para o sistema elétrico. Atualmente são aplicadas técnicas específicas na inspeção remota de isoladores, tais como câmeras ultravioletas (câmera corona), ultrassom, termovisão e radio interferência (RFI - *Radio frequency interference*) [3]–[8].

Os isoladores, sejam os empregados na geração, transmissão ou distribuição, possuem processos de degradação semelhantes, normalmente apresentado pelo surgimento de descargas parciais que podem ser internas, superficiais ou do tipo corona. Por serem descargas elétricas, se manifestam como ondas eletromagnéticas no espectro de rádio frequência, sendo assim possível a detecção destes sinais a partir de equipamentos de RFI [4].

Atualmente os equipamentos de RFI encontrados no mercado são de alto custo, o que inviabiliza sua utilização no dia a dia dos eletricitistas em suas atividades corriqueiras. As inspeções somente são realizadas quando surgem reclamações de rádio interferência, estruturas em risco, equipamentos de alto valor monetário ou que exigem alta confiabilidade. Tendo em vista que isoladores são os componentes em maior número instalados no sistema elétrico e que a falha de um único isolador pode levar a prejuízos e efeitos de grandes proporções, seria desejável a inspeção dos mesmos constantemente, com o intuito de prevenção de falhas.

Com esta motivação, está sendo desenvolvido um protótipo de baixo custo de um detector de RFI utilizando um SDR (*Software Defined Radio*) e um computador portátil de baixo custo, os quais serão apresentados neste trabalho.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Alguns conceitos, descrições e dispositivos serão apresentados neste tópico, a fim de contextualizar a problemática abordada.

### II.a. Descargas Parciais

As descargas parciais têm sua terminologia normatizada pela IEC-270 [9] e pela norma brasileira NBR-6940 [10]. Sucintamente define-se descarga parcial como a descarga elétrica que ocorre em uma região do espaço submetida a um campo elétrico, cujo caminho condutor formado pela descarga não une os dois eletrodos de forma completa [11].

Estas descargas parciais são classificadas em três tipos: internas, superficiais e do tipo corona. As descargas internas são devidas aos vazios no interior do material isolante, tais como bolhas, que podem ser geradas durante o processo de fabricação dos componentes isolantes. Estes vazios distorcem



o campo elétrico no interior do material gerando micro descargas que vão degradando o isolante até a sua ruptura [4], [12]. A Figura 1 ilustra a evolução de uma descarga parcial interna no dielétrico que separa dois eletrodos.



Figura 1. Ilustração da evolução de uma descarga parcial interna [17]

As descargas parciais superficiais surgem a partir do depósito de sujeira e poluição sobre a superfície dos isoladores, gerando o efeito de bandas secas caracterizado pela passagem de corrente elétrica superficial com alta dissipação de calor o que resulta na degradação não uniforme do material isolante. Este efeito também é conhecido como trilhamento elétrico [4], [12]–[14]. A Figura 2 mostra a fotografia de um isolador elétrico retirado de campo devido à degradação por descargas parciais superficiais.



Figura 2. Isolador retirado de campo devido a degradação por descargas parciais superficiais [12]

As descargas parciais do tipo corona são aquelas que ocorrem a partir de eletrodos condutores pontiagudos energizados, resultando em uma intensificação do campo elétrico, que quando atinge um valor superior à rigidez dielétrica do meio resulta no efeito de ionização [4], [15], [16].

A Figura 3 apresenta uma fotografia de uma descarga parcial gerando o efeito corona na ponta de um eletrodo.

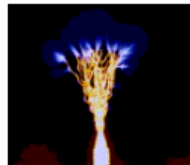


Figura 3. Eletrodo com efeito corona [18]

#### II.b. Inspeção instrumental de isoladores por RFI

Quando há o surgimento de descargas parciais em componentes isolantes, observa-se que as mesmas emitem energia das seguintes formas [19]–[21]:

- Emissões eletromagnéticas em forma de rádio frequência, luz e calor
- Emissões acústicas na faixa do audível e do ultrassom
- Ozônio e gases de óxido de nitrogênio.

Com base nestas características de emissão, equipamentos para inspeção instrumentalizada de isoladores foram desenvolvidos, tais como equipamentos de ultrassom (emissões acústicas), câmeras ultravioleta (emissões eletromagnéticas de ultravioleta), câmeras termográficas (emissões eletromagnéticas de infravermelho) e equipamentos de Rádio Interferência (RFI) (Emissões eletromagnéticas de rádio frequência).

Por definição RFI é a radiação ou condução de ruído de rádio frequência produzido por equipamentos eletroeletrônicos cujos níveis interferem na operação de equipamentos adjacentes, sendo que as frequências de maior interferência são de 10 kHz a 30 MHz (conduzido) e 30 MHz a 1 GHz (irradiado)[22].

Em trabalhos anteriores [4], [23] os resultados na detecção por RFI apontaram para um desempenho entre 80% e 90% de acertos na identificação de isoladores de pino com defeito, em ensaios realizados em laboratório com isoladores retirados de campo.

#### II.c. SDR – Software Defined Radio

Com o crescimento e popularização dos meios de comunicação, que envolvem diversos tipos de tecnologias e modulações, alterar equipamentos de rádio (transmissor e receptor) de maneira fácil e eficiente tornou-se um desafio. A tecnologia de “Radio definido por software” (SDR – *Software Defined Radio*) surgiu em função desta demanda, trazendo flexibilidade, eficiência e baixo custo necessário para a evolução das comunicações [24].

A definição de SDR apresentada pelo grupo de trabalho do IEE P1900.1 diz que um SDR é um rádio onde alguma ou todas suas funções das camadas físicas são definidas por *software* [24], [25]. Isto significa que suas funções operacionais, tais como filtragens e demodulação, são processadas através de um código de programa, que pode ser alterado mediante a necessidade de evolução ou alteração da tecnologia. Com isso, pode-se utilizar o mesmo *hardware* para diversos tipos de rádio, o que reduz significativamente o custo de produção em larga escala.

### III. DESENVOLVIMENTO

Para o desenvolvimento deste trabalho foram realizadas as seguintes etapas:

- Caracterização das componentes de RF das descargas parciais em isoladores de vidro do tipo disco
- Especificação dos componentes:
  - SDR
  - Computador de baixo custo
- Implementação
- Testes em laboratório

Para definir quais métodos de análise, medição e detecção seriam mais adequados à detecção das descargas parciais nos isoladores, fez-se necessário a caracterização do sinal interferente. Para isso foi montado o arranjo de ensaio como mostra na Figura 4, o qual consistiu em um isolador de disco de vidro com a parte superior aterrada e uma tensão elétrica AC 60 Hz aplicada na parte inferior. Elevou-se a tensão aplicada até que houvesse o início das descargas do tipo corona.



Figura 4: Arranjo de ensaio

Os sinais de rádio frequência foram amostrados no domínio do tempo através de um osciloscópio digital (Tektronix modelo MSO 2012B) com o auxílio de uma antena monopolo (LARSEN modelo NMOQ) colocada a uma distância de cinco metros do isolador. Esta mesma antena é utilizada por um equipamento de RFI comercial para inspeção de redes elétricas, adotado por concessionárias de energia. Após coletar uma série de dados para diferentes isoladores com estados de degradação diferentes, os sinais foram transformados para o domínio da frequência aplicando-se a transformada de *Fourier*.

As Figura 5 e Figura 6 apresentam as comparações do sinal medido no domínio da frequência (curva preta) confrontado com o ruído de fundo (curva vermelha) respectivamente para um isolador novo submetido a uma tensão de 20 kV e um isolador corroído submetido a tensão de 20 kV.

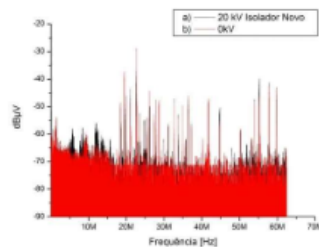


Figura 5: Espectro de frequência obtido com um isolador novo em duas condições de tensão aplicada, 20 kV (a) e 0 kV (b)

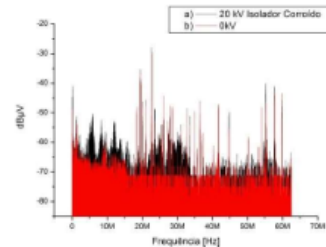


Figura 6: Espectro de frequência obtido com um isolador corroído em duas condições de tensão aplicada, 20 kV (a) e 0 kV (b)

A partir destes resultados verificou-se que para o isolador corroído houve uma intensificação do ruído nas faixas de frequência de 10 MHz, 30 MHz e de 40 MHz a 60 MHz.

Através destes resultados buscou-se no mercado dispositivos SDR que atendessem algumas destas faixas de frequência. Assim encontrou-se um dispositivo SDR que utiliza os circuitos integrados R802T e RTL2832. O R802T é responsável pela sintonia das faixas de frequência e misturador, enquanto que o RTL2832 realiza a conversão analógico-digital do sinal e a interface com um computador. O dispositivo escolhido, que pode ser observado na Figura 7, possui faixa de operação entre 24 MHz e 1850 MHz, dimensões reduzidas e baixo custo.



Figura 7: Interface SDR - RTL2832 e R802T

O dispositivo foi submetido a testes de laboratório a fim de caracterizar a resposta em frequência. Para tal conectou-se diretamente a entrada do dispositivo em um gerador de sinais de RF (Agilent E4432B) configurado para efetuar varreduras em frequência. As Figura 8 e Figura 9 apresentam respectivamente, o ruído de fundo do sistema e a resposta em frequência com o dispositivo sintonizado na frequência de 30 MHz. Os testes foram realizados com um PC utilizando o *software* SDR#.

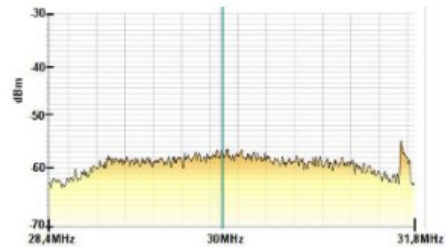


Figura 8: Ruído de fundo do SDR [frequência x amplitude], na faixa de frequência de 28,4 MHz a 31,8 MHz, obtido com a entrada conectada a uma carga de 50  $\Omega$

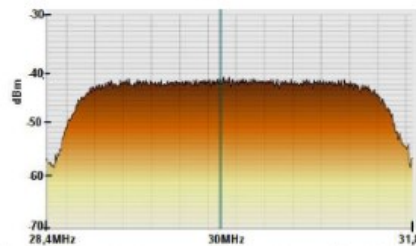


Figura 9: Resposta do SDR a um sinal de -50 dBm na faixa de frequência de 28,4 MHz a 31,8 MHz. O sinal medido no centro da faixa (30,1 MHz) foi de -42 dBm, indicando um erro de 8 dB em relação ao sinal injetado

Identificou-se que para a janela de amostragem de 3,4 MHz houve uma atenuação nos extremos, resultando em uma resposta linear para a faixa central de  $\pm 1,3$  MHz (*span* 2,6 MHz).

Realizou-se também um teste de linearidade em amplitude do SDR, na frequência de 40 MHz. A amplitude do sinal injetado pelo gerador de sinais (Agilent E4432B) foi variada de -70 a -10 dBm e os valores foram comparados com os medidos pelo SDR. Este resultado pode ser visto na Figura 10, onde pode-se observar que o sinal medido pelo SDR possui boa linearidade na faixa de -40 a -10 dBm. Na faixa de -70 a -40 dBm a linearidade é comprometida, provavelmente pela baixa qualidade do misturador e nível de ruído dos componentes utilizados. Esta não linearidade não chega a impactar na detecção das descargas parciais.

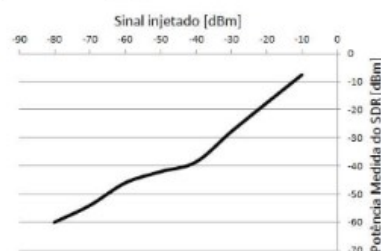


Figura 10: Curva de linearidade em amplitude do SDR na frequência de 40 MHz

Após validação das características do dispositivo que irá fazer a interface do sistema SDR, iniciou-se a fase de implementação do sistema completo utilizando-se um computador de baixo custo do tipo *Raspberry Pi* modelo B+ como apresentado pela Figura 11. Foi realizado o estabelecimento da comunicação entre os dispositivos e operação via software embarcado no próprio *Raspberry Pi*.



Figura 11: *Raspberry Pi* Modelo B+ com a interface SDR

Foram realizados testes de detecção do efeito corona em isoladores empregando o sistema de medição desenvolvido para comprovação da aplicabilidade do conjunto na detecção de descargas parciais. A descarga corona foi produzida por dois eletrodos, sendo uma ponta energizada com um potencial de 27 kV contra um plano aterrado.

Configurou-se o conjunto para detecção em gráfico *Waterfall* (espectrograma), ajustando os valores de ganho e limites para que fosse possível a detecção do ruído, o dispositivo foi sintonizado na frequência de 40 MHz com uma banda de 1 MHz. Neste ensaio utilizou-se a antena monopolo LARSEN modelo NMOQ conectada ao SDR.

A Figura 12 apresenta o espectrograma codificado em cores (azul: menor amplitude, vermelho: maior amplitude) da medição durante o ensaio de corona utilizando o sistema desenvolvido (SDR+*Raspberry Pi*). O processamento gráfico dos dados é feito no próprio *Raspberry Pi*, que gera uma saída de vídeo no padrão HDMI. A região do gráfico contida no retângulo preto indica as medições do ruído de fundo sem a presença de corona, enquanto que a região contida no retângulo vermelho representa a medição do efeito corona durante o ensaio.

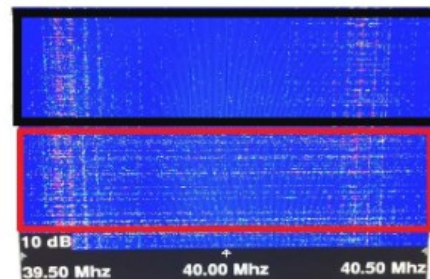


Figura 12: Espectrograma (frequência x tempo) do ruído captado sem (região superior) e com (região inferior) a presença de descargas parciais

Quando as descargas corona foram iniciadas, percebe-se na região central do gráfico um aumento significativo de pontos vermelhos/verdes indicando o surgimento de componentes de rádio frequência geradas pelas descargas.

#### IV. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou as etapas do desenvolvimento de um sistema de detecção de RFI de baixo custo baseado em um SDR, voltado para a detecção de descargas parciais em isoladores elétricos. O sistema consiste na integração de uma interface SDR com um computador *Raspberry Pi*, juntamente com um software para comunicação entre os módulos e análise gráfica dos resultados. O sistema é portátil (dimensões e peso semelhantes a um *smatphone*) e será alimentado por uma bateria, proporcionando autonomia da ordem de 2 horas, suficiente para efetuar vários testes em campo. O *software* de processamento gráfico está em fase de melhorias, de modo a permitir uma melhor visualização da presença ou não das descargas parciais.

Estima-se que ao final do desenvolvimento seja possível a obtenção de um equipamento com custo aproximado entre R\$700,00 e R\$800,00, bem inferior aos US\$ 15000,00 a US\$ 60000,00 dos equipamentos comerciais disponíveis.

Ao desenvolver um equipamento portátil de baixo custo, pretende-se que o mesmo possa ser utilizado por um maior número de equipes de manutenção das concessionárias de energia. Desta forma pode-se detectar previamente isoladores com defeito antes da ocorrência de falhas, garantindo maior confiabilidade do sistema, desempenho e continuidade de serviço.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Institutos Lactec pela disponibilização da infra estrutura para os testes, aos colegas e amigos que de forma direta e indiretamente contribuíram para o desenvolvimento do presente trabalho.

Os autores agradecem a Eletronorte pela disponibilização de materiais para realização dos testes em laboratório.

Os autores agradecem ao CNPq pelo benefício da lei 810/90.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica, "Indicadores de Continuidade." [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=79>.
- [2] Agência Nacional de Energia Elétrica, "Divulgação dos limites dos indicadores DIC, FIC, DMIC e DICRI." [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/srd/indqual/default.cfm>. [Accessed: 06-Jun-2014].
- [3] L. P. Alessi and S. K. Ogawa, "Estudo comparativo entre as técnicas aplicadas à inspeção instrumentalizada de redes de distribuição de energia elétrica," Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2010.
- [4] V. S. Borges, "ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE DETECTOR DE ISOLADORES COM FALHAS," 2011.
- [5] A. L. Gorchinski, H. M. S. Amarante, J. L. Kovaleski, E. A. Á. de Matos, and A. C. de Francisco, "Termografia em redes de distribuição de energia elétrica," 2013.
- [6] K. Kannus, A. Lehtio, and E. Lakervi, "Radio and tv interference caused by public 24 kV distribution networks," *IEEE Transacion Power Deliv.*, vol. 6, no. 4, pp. 1856-1861, 1991.
- [7] American Society for Testing and Materials - ASTM, "Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity ( Dielectric Constant ) of Solid Electrical Insulation," 2012, no. C, pp. 1-20.
- [8] P. J. Moore, I. E. Portugues, and I. A. Glover, "Radiometric Location of Partial Discharge Sources on Energized High-Voltage Plant," *IEEE Transaction Power Deliv.*, vol. 20, no. 3, pp. 2264-2272, 2005.
- [9] IEC - International Electrotechnical Commission, "IEC 270 - Partial Discharge Measurements," *Int. Electrotech. Comm.*, 1981.
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR 6940 - Técnicas de Ensaios Elétricos de Alta Tensão Medição de Descargas Parciais," 1981.
- [11] A. KREUGER, F.H., GULSKI, E. e KRIVDA, "Classification of partial discharges," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 28, pp. 917-931, 1993.
- [12] D. R. AMBRÓZIO and I. NOVOLAR, "Análise das técnicas de ultra-som e rádiointerferência para verificação da ocorrência de descargas parciais em isoladores," 2009.
- [13] R. C. FAGUNDES, "Avaliação de Acessórios Poliméricos de Redes Compactas protegidas por meio de Ensaio de Multiestressamento e Simulação Computacional," Universidade Federal do Paraná, 2008.
- [14] K. F. PORTELLA and et al., "Efeitos da poluição atmosférica (fitorânea e industrial) em isoladores da rede elétrica da região metropolitana de Salvador," *Quim. Nova*, vol. 31, pp. 340-348, 2008.
- [15] M. MUNARO and E. AL., "Fatores de influência na compatibilidade de cabos protegidos, isoladores e acessórios utilizados em redes aéreas compactas de distribuição de energia elétrica, sob condição de multi-estressamento," *Congr. INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERG. ELÉTRICA*, pp. 555-560, 2003.
- [16] A. A. COSTA, "Aperfeiçoamento do Método FETD para simulação de Descargas Elétricas Não-Lineares," Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2007.
- [17] V. SWINKA FILHO, "Imagens de defeitos por descarga parcial estimulada por raios-X pulsado em materiais dielétricos poliméricos," Universidade Federal do Paraná, 2000.
- [18] Spellman High Voltage Electronics Corporation, "Spellman High Voltage Electronics Corporation." [Online]. Available: <http://www.spellmanhv.com/Technical-Resources/Fags/Technology-Terminology/What-is-corona.aspx>.
- [19] The Partial Discharge Academy, "What is PD? Partial Discharge." [Online]. Available: <http://www.partial-discharge-academy.com/what-is-partial-discharge>. [Accessed: 28-Apr-2015].
- [20] J. M. R. De Souza Neto, E. C. T. De Macedo, J. S. Da Rocha Neto, E. G. Da Costa, S. a Bhatti, and I. a Glover, "Partial Discharge Location using Unsynchronized Radiometer Network for Condition Monitoring in HV Substations - A Proposed Approach," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 364, p. 012053, May 2012.
- [21] I. E. Portugues, P. J. Moore, I. A. Glover, C. Johnstone, R. H. Mckosky, M. B. Goff, and L. Van Der Zel, "RF-Based Partial Discharge Early Warning System for Air-Insulated Substations," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 1, pp. 20-29, 2009.
- [22] Curtis Industries, "Understanding Terminology," *Tech. Considerations*, pp. 84-85.
- [23] E. . KOWALSKI and et al., "Sistema de inspeção instrumental para detecção de falhas em isoladores nas linhas de distribuição," 2006.
- [24] Wireless Innovation, "Wirelessinnovation." [Online]. Available: <http://www.wirelessinnovation.org/assets/documents/SoftwareDefinedRadio.pdf>.
- [25] SDR Forum, "SDRF Cognitive Radio Definitions," *SDR Forum*, 2007. [Online]. Available: [http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-06-R-0011-V1\\_0\\_0.pdf](http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-06-R-0011-V1_0_0.pdf).